量子宇宙への3つの道

Three Roads to Quantum Gravity

THREE ROADS TO QUANTUM GRAVITY

リー・スモーリン

林 一＝訳

SCIENCE MASTERS

サイエンス・マスターズ 17

草思社

量子宇宙への3つの道

17

Three Roads to Quantum Gravity
Lee Smolin

リー・スモーリン
林一＝訳

草思社

THREE ROADS TO QUANTUM GRAVITY
by
Lee Smolin

Originally published by Weidenfeld & Nicolson,
a menber of The Orion Publishing Group, London.
Japanese translation rights arranged with Brockman, Inc., New York,
through Tuttle-Mori Agency, Inc., Tokyo.

量子宇宙への3つの道

目次

プロローグ 量子重力の探究

本書がかかわるのは、あらゆる問いのなかでもっとも簡単なもの、時間と空間とは何か、である。だが、これはまたたいへん答えにくい質問だ。科学の革命がどんな答えを創り出すかによって、進歩の度合いが測られる。現在そうした革命のさなかにあり、空間と時間を説明するアイデアは、たった一つではなくいくつも提案されている。本書は最前線からの報告であることを目指しているが、やさしい言葉でこうしたアイデアを伝え、関心ある読者がわくわくするような発展についていけるようにする。これが私のねらいだ。

空間と時間を考えるのはむずかしい。人間の経験すべての背景をなしているからだ。すべてのものはどこかの場所に存在し、何ごともいずれかの時間でなければ起こりようがない。だが、われわれは自分の文化の前提について知らなくても生きていけるように、空間と時間の本性について尋ねなくても生きていける。しかし、だれにでも、時間というものを不思議がった子供時代があるはずだ。

時間はいつまでもつづくのか？　最初の瞬間はあるのか？　最後の瞬間はあるのか？

空間についても同じことが尋ねられる。空間はどこまでも存在するのか？

人間は生まれて問うことを学んだときから、こうした問いかけをくり返してきた。何万年か前、洞窟に絵を描いた人たちが、夕食後、火を囲んでいたときに、こうした質問をしなかったとしたら、そのほうが驚きだ。

過去一〇〇年ほどのあいだに、われわれは物質が原子でできていることを知り、今度はそれらが電子、陽子、中性子でできていることを理解した。人間の知覚はときにはすばらしいが、宇宙を組み立てているものを直接見るには、あまりにも粗すぎる。小さいものを見るには道具が要る。顕微鏡は生命をつくっているものを見せてくれたが、原子を見るにはその一〇〇〇分の一の尺度が見えなくてはならない。粒子加速器などの道具を用いれば、さらに小さな原子核を見ることができ、陽子と中性子を形づくっているクォークでさえ見

ることができる。

こうしたことはすばらしいが、それ以上に問題を突きつける。電子とクォークは可能な限りもっとも小さいものなのか？　それともそれ自身、もっと小さいものでできているのか？　物質だけではなく、空間についても同じような疑問が生じる。空間は連続的に見えるが、ほんとうにそうだろうか？　空間の体積は好きなだけ分割できるのか、それとも最小の体積があるのか？　最小の距離はあるのか？　同じようなことを時間についても知りたい。時間は無限に分割可能なのか、それとも最小の可能な時間があるのか？

一〇〇年ほど前まで、これらの問いには一組の答えしかなかった。それらがニュートン物理学の基礎を形づくっていた。二十世紀のはじめに、ニュートン物理学は、科学と技術の発展にはこれまで同様役立つものの、空間と時間の説明としては根本的に間違っていることを人々は理解したのだった。ニュートン物理学を投げ捨てるとともに、これらの問いにも新しい答えが、新しい理論とともに現れた。それは主としてアインシュタインの相対性理論とボーア、ハイゼンベルク、シュレディンガーその他大勢の手になる量子論からもたらされた。しかし、これははじまりにすぎなかった。どちらも物理学の基礎になるには不十分だったのだ。有用であり、多くの疑問に答えを与えるものではあったが、いずれも普遍的な説明ではなかったのである。

量子論は、なぜ安定した原子が存在するかを説明するために考案された。ニュートン物理学を用いて原子構造を記述すると、どうしてもばらばらになるという結論にいたってしまう。物質と放射の多くの性質も説明できたが、分子あるいはそれ以下の尺度では、量子論の予測はニュートン物理学が下した予測とはしばしば食い違った。一方の一般相対性理論は、空間、時間と宇宙の理論である。その予測は非常に大きな尺度ではニュートン理論と著しく食い違っていたので、一般相対性理論を裏づける多くの観測結果は天文学から得られている。しかし、一般相対性理論で原子と分子のふるまいを説明しようとすると破綻をきたす。同じように、量子論はアインシュタインの一般相対性理論の基礎にある空間と時間の記述と両立できそうもない。二つの理論をいっしょにして、原子から太陽系を越えて、全宇宙にのびる一貫した理論をつくるのは無理なのだ。

相対性理論と量子論をなぜいっしょにできないか。そのわけは説明にかたくない。物理学はたんにどんな粒子と力が世界に存在するか書き並べてあるカタログではない。身の回りに見えるものを記述しようとしたら、その前にまず、それは何なのか、何らかの仮定を立てる必要がある。科学とはそういう風にするものなのだ。だれでも夢を見るが、しかし、夢と目覚めているときの経験を区別するのに困難を感じる人はいないだろう。だれでも物語を話すが、大部分の人は事実とフィクションには違いがあると信じている。その結果、

夢、フィクションと通常の経験について異なる仕方で語るが、これはそれぞれと現実との関係が異なる仮定にもとづいているからだ。これらの仮定は人によっても文化によっても多少変わるし、またさまざまなアーティストによる修正をこうむるだろう。その仮定が明確にされていないと、混乱や見当違いにいたるのは避けられない。

同じように、観測と実在を見るにあたって、どのような仮定を基礎とするかによって物理理論も違ってくる。もし異なる理論から導かれた記述を比較するときには、基本となる前提が異なることに留意していないと、混乱が生じるだろう。

本書では異なる理論が生まれるもとになる基本的な考え方に関心を寄せる。第一は、空間と時間は何かという問いに対する答えである。ニュートン理論と一般相対性理論はそれぞれ異なる答えにもとづいている。それぞれの答えがどのようなものであるかはすぐ後で述べるが、重要なのはアインシュタインが空間と時間に関する理解を永久に変えたことである。

もう一つ、観測者が観察しているシステムにどう関係しているか、という点でも理論はわかれてしまう。そこには何らかの関係があるはずだ。さもなければ観測者はシステムの存在にすら気づかないだろう。しかし理論が異なれば、観測者と観測されるものの関係についての前提も大いに異なることがある。具体的にいえば、量子論は、この問題に関して

ニュートンが置いた前提とは根本的に違う仮定を立てた。

問題は、量子論が観測者と観測されるものとの関係についての前提を根本的に変更しておきながら、空間と時間が何であるかという問題についてはニュートンの古い答えをそのまま受け入れたことである。アインシュタインの一般相対性理論ではちょうど反対のことが生じた。空間と時間の概念が根本的な変更をこうむったが、観測者と観測されるものに関するニュートン的な関係は保持されたままである。どちらの理論も少なくとも部分的に正しいように見えるが、いずれも相手の理論が退ける古い物理学から取った前提を残している。

新しい理論は、アインシュタインが導入した新しい空間と時間の概念と、量子論が教えている、観測者と観測されるものとの新しい関係とを何としても統合しなければならない。もしそれが可能であると証明されなければ、どちらも退けなければならず、空間とは何か、時間とは何か、観測者と観測されるものとのあいだにどのような関係があるかという問いに、また別の新しい答えを見いださなければならなくなる。

新しい理論はまだ完成していないが、すでに名前はある。それは重力の量子論、すなわち量子重力論だ。この名前は、理論の鍵となる部分に、原子と素粒子の理解の基礎となる量子論を、重力論に拡張したものが含まれていることからつけられた。重力は現在では一

般相対性理論の文脈で理解されている。一般相対性理論によって、重力に空間と時間の実際の構造が現れていることがわかるのだ。これはアインシュタインのもっとも驚くべき、もっとも美しい洞察であり、これについてはおいおい多くを語ることになるだろう。いま直面しているのは(基礎物理学の専門的な言い方では)アインシュタインの一般相対性理論と量子論を統一する問題である。この統一の産物が量子重力論なのだ。

それが手に入れば、量子重力論は、空間とは何か、時間とは何かという問いに新しい答えをもたらすだろう。しかし、これがすべてではない。量子重力論は物質の理論でもあらねばならない。前世紀に得られた素粒子とそれを支配する力に関する洞察をすべて含まねばならない。また、それは宇宙論でもあらねばならない。それを手に入れたとき、神秘的に見える宇宙の起源をめぐる問題、たとえばビッグバンは時間の最初の瞬間か、それとも既存の異なる世界からの転移にすぎないのか、といった問いに答えてくれるだろう。

二十一世紀に入るにあたり、科学にとってこの理論を完成する以上にやり甲斐のある問題はない。読者は大勢の人たちとともにたぶんこう訝るだろう。これはむずかしすぎるのではないか、あるいはいつまでも未解決のままではないか、数学上のいくつかの問題や意識の本性のように不可能問題なのではないか、と。この理論がかかわる問題の大きさ、広さから、読者がそう思われたとしても不思議ではない。二五年前、私が大学で量子重力論

の研究に取りかかったころ、何人かの教師が忠告してくれた――そんな問題に取り組むのは馬鹿だけだぞ。その当時、量子重力論に本気で取り組む者はごく少数だった。彼らがディナーパーティをしたかどうか知らないが、そのくらいの人数だった。

大学院で私の指導教官だったシドニー・コールマンは何とか私を説得して他のことをさせようと企んだ。私が渋っていると、彼は、ではあと一年だけやろう、と言ってくれた。そのあいだに彼の予想通り何の進展も見られなかったら、もっとやりやすい素粒子物理学のプロジェクトを君に割り当てるつもりだ、と彼は宣告した。でも彼は私に多大の恩恵を施した。彼はこの分野のパイオニアの一人、スタンレー・デッサーを探して、私の面倒を見、監督を共同でするよう頼んだ。当時デッサーは超重力論と呼ばれる新しい重力論の創始者の一人になったばかりだった。この理論は数年のうちに、それまで解決がむずかしかった難問を多数解いたのだった。私はまた幸運にも、大学院一年のときに、量子重力論に重大な貢献をなしたもう一人の人物、ゲラルト・トフーフトの講義を聞くことができた。かりに私がどちらの指示にもしたがわなかったとしても、彼らの仕事から決定的な教訓を学んだ――懐疑主義者の言うことなど無視してやっていけば、一見不可能な問題でも進歩を遂げることはできるのだ。いずれにしろ原子は落下するのだ。だから重力と量子の関係は自然にとっては不思議なことでも何でもない。もしそれがわれわれにとって問題であれ

ば、われわれの思考のどこかに誤った仮定があるせいだ。少なくとも一つの、いやもしかしたらいくつもの誤りが。少なく見つもっても、空間と時間の概念と観測者と観測されるものの連関の二つの仮定が含まれているはずだ。

量子重力論を発見する前に、誤った仮定を隔離しなければならないのは自明に思えた。これで前に進むことが可能になる。というのは間違った仮定をしらみつぶしにつぶすという明快な戦略があるからだ――試しに理論をつくれ、そしてどこで行きづまるか調べろ、だ。そのときまでに通ったすべての大通りは、遅かれ早かれ行き止まりにぶつかると判明するから、やるべき仕事はたっぷりあった。これは多数の人を鼓舞するものではないが、必要な仕事であったし、しばらくはそれで十分だった。

いまでは状況はがらりと変わっている。この分野の研究者で、目標への道をかなり進んだことに疑いをはさむ者は少ない。一九八〇年代半ば以降、われわれは量子論と相対性理論をうまく結びつける方法を見つけ出した、というのがその理由だ。それまではすべて失敗していたのだ。その結果、過去数年間にパズルの大きな部分は解けてしまったのだ。

われわれの成功の一つの結果は、この試みが突然流行したことだ。数十年前、この問題を追いかけていた少数のパイオニア集団はいまや大きなコミュニティに育っており、数百人の人がフルタイムで量子重力論のなんらかの側面をめぐる仕事についている。実際、わ

れわれは嫉妬深い霊長類のように、異なるアプローチを追求する小さなコミュニティに分裂している。これらはひも、ループ、ツイスター、非可換幾何学、トポスなど、異なる名前で呼ばれている。この行きすぎた単純化は不幸な結果を生んでいる。それぞれのコミュニティには自分たちのアプローチこそ問題を解く鍵を握っていると確信している人たちがいる。しかし、悲しいことに彼らの大部分は、他のアプローチで働いている人たちを興奮させるほどには、主要な結果についてくわしく理解していない。量子重力論のある側面で研究している人たちが、十分広い視野をもたず、解決のために最近なしとげられた進歩をすべて取り入れることができないのだ。

これは驚くようなことではない――ガン研究あるいは進化理論の現状とあまり変わらないかもしれない。問題がむずかしいために、未登頂の峰を登ろうとする人のように、異なる人々が異なる峰から頂上を目指しても不思議ではない。もちろん、これらのアプローチのなかには完全な失敗に終わるものもあるだろう。しかし量子重力論の場合、少なくともいくつかのアプローチは最近、空間と時間の本性についてほんとうの発見にいたったようだ。

私がこれを書いている最中に起こったもっとも迫力のある発展は、異なるアプローチから得られるさまざまな知見を一つにすることとかかわるもので、単一の理論――重力の量

子論――に取り入れることができる。単一の理論は未だ最終的な形にまとまっていないが、それについて大量のことが知られており、これがこれからのいくつかの章で私の書くことの基礎になっている。

読者にお断りしておくが、私は生まれつき非常に楽観的な人間である。われわれは数年以内に完全な量子重力論を手にするだろうというのが私自身の見解であるが、私の友人たちはもっと慎重だ。だからこれから述べることは個人的な見解であって、量子重力論をやっている科学者あるいは数学者すべてが支持しているわけではないことを、強調しなくてはならない。

さらに付け加えなくてはならないが、これまで新しい量子重力論を実験的にテストする可能性はなかった。ごく最近まで、量子重力論が既存の技術では検証できないと、したがって実験科学のデータとつきあわせ、裏づけを得るのは何年も未来のことだろう、と信じられていた。ところが、いまにして思えばこの悲観論は近視眼的だったかもしれない。たとえばポール・ファイアベントのような科学哲学者が強調しているように、新しい理論はしばしば新種の実験を示唆し、それが検証に応用されるかもしれないのだ。ごく最近、新しい実験方法が提案され、近い将来、少なくとも理論的に予測されたいくつかの現象は検証可能になるだろう。これらの新しい実験は既存の技術を用いながら、驚くべき仕方でそ

れを用いて、古い枠組みでは量子重力論と何の関係もないと思われていた現象を研究する。

ここ数年のあいだに、量子重力論の研究者たちはしだいに興奮し、自信をもつようになってきている。われわれが獲物を捕らえたという感じは否めない。まだ網に入れていないがたしかに追いつめており、フラッシュライトで何度か姿を垣間見ている。

量子重力論へいたる何本かの道のなかで、もっとも交通量が多い、もっとも近いのは、三つの大通りに沿うものだ。量子重力論が二つの理論――相対性理論と量子論――の統合から生まれるとすれば、この二つは予想されるところだ。まず、量子論から行く道がある。用いられているアイデアと方法の大部分はまず量子論で発展されたものだ。つぎに相対性理論からの通路がある。アインシュタインの一般相対性理論の本質的な原理からはじめ、量子現象が含まれるような修正を施そうと試みる。この二つの道はそれぞれ十分考え抜かれ、そして量子重力論の部分的な成功を導いた。最初の通路はひも理論を生み出し、第二の通路は一見異なる理論（名前は似ているが）、ループ量子重力論に通じる。

ループ量子重力論とひも理論は基礎の一部が合致する。ある物理的尺度が存在し、そこでは空間と時間がわれわれの観測するものとは著しく異なっていると考える点ではおなじだ。この尺度は極度に小さいために、最大の粒子加速器でおこなった実験でさえ、その域にはいたれない。それは事実、われわれがこれまで探索したものよりもずっと小さい。通

常は、原子核よりも二〇桁も（すなわち因子10^{20}も）小さいと考えられる。しかしながら、どのくらい小さいかは確信がもてないが、最近、たいへん想像力に富む示唆がなされている。もしそのとおりになれば、量子重力効果を現在の実験能力のおよぶ範囲に入れられるだろう。

量子重力論が空間と時間を記述するのに必要な尺度はプランク尺度と呼ばれている。ひも理論とループ量子重力論はどちらも、この小さな尺度で空間と時間がどのようなものか、に関する理論である。

私はループ量子重力論で働いた最初の一人である。私の生涯でもっとも高揚した日々は、何カ月も働きづめに働いた末に、突如、われわれの理論の基本的教訓の一つを理解した日々であった。ともにそれをなしとげた友人は生涯の友であり、その時の発見に対しても同じように愛情と希望をもっている。だが、私はその前にはひも理論を研究しており、そして過去四年間、私の研究は二つの理論のあいだの肥沃な領域でなされた。ひも理論とループ量子重力論の本質的な結論は真であると私は信じており、そしてここで提供する世界像は両方の理論をきちんと研究することからもたらされるのだ。

ひも理論とループ量子重力論とは別に、つねに第三の道もあった。この道をたどったのは、相対性理論と量子論には欠陥が多く、正当な出発点としては不完全だと放棄した人び

とだった。彼らは基本原理と取り組み、新しい理論をそこから直接に打ち立てようと企てた。古い理論を参考にしたが、まったく新しい概念的世界と数学的形式を発明することを恐れなかった。十分大きなコミュニティの人びとが他の二つの道を歩んでいるのとは違い、こうした第三の道をたどるのは少数の者だけだった。それぞれ、彼あるいは彼女のビジョンを追求し、銘々が愚か者か予言者だった。同じ考えの探究者の群と旅をする慰めよりも、本質的な不確実性を選んだのだった。

第三の道を行く旅は、深い、哲学的な疑問につき動かされている。「時間とは何か？」あるいは「われわれが参加者であるこの宇宙をどう記述するのか？」といった疑問だ。これらはやさしい問いではないが、われわれの時代のもっとも偉大な精神の持ち主がそれらを選んで真っ向から答えようとしたし、私もまたこの道を行けば偉大な進歩があると信じる。新しい、そしてときには、まったく驚くべきアイデアが発見されたし、これらの問いに対する答えに近づいていると私は信じている。彼らが概念的枠組みを提供し、われわれは次のステップ、量子重力論に向かって進むことが可能になるだろう。

また、この三番目の道の途上で、最初は何の関連もないように見える数学的構造が発見されることがある。こうした結果はより保守的な人たちにはしばしば現実とかかわりがないとして切り捨てられることがある。しかし時に、同じ構造が驚いたことに二つの道の一

方に現れて、他の方法では解けないと思われていたものの答えだとわかって、切り捨てた批判者が前言を取り消すことになる。これはもちろん、基本的な問いが偶然に解かれることは滅多にないことを示している。こうした構造を発見した人はこの物語のほんとうのヒーローである。アラン・コンヌ、デイヴィッド・フィンケルスタイン、クリストファー・イシャム、ロジャー・ペンローズとラファエル・ソーキンらがそのような人たちだ。

本書で私は三つの道すべてを通る。それらの道が見かけよりも近いことがわかるだろう。たがいをつなぐ道はあまり使われておらず、たぶん植物が少々繁茂しすぎているが、それにもかかわらず通行可能である。道々見つけたキーアイデアと発見を寄せ集めると、世界がプランク尺度でどう見えるか。この描像を提示することによってわれわれが量子重力論の問題の解決にいかに近づいているかを示そうと思う。

本書を書くにあたって、知的な素人、物理学の最前線で何が起こっているのか知りたがっている人たちを読者に想定した。相対性理論あるいは量子論についていかなる知識も前提にしていない。

もう一つ、アイデアの創始者あるいは発見者について然るべき名前が示されていないことをお断りしなければならない。量子重力論についての知見は一人二人のネオ・アインシュタインから生まれたわけではない。ふくらみつつある科学者コミュニティの数十年にわ

たる勤勉な努力の成果なのである。多くの場合、ほんの数人の名をあげると、科学者コミュニティと読者に対してかえって迷惑だ。科学は少人数の偉大な個人が孤立しておこなうという神話を助長してしまう。

何が起こったか私が十分に自信をもって知っていると言えるいくつかのエピソードについては、発見がどうなされたかという物語にしたてた。自分がよく知らないことについては、語るのを差し控えた。私は過去二〇年ものあいだ、科学の進展を身近に観察してきた一人ではあるが、どうしても過ちは避けがたいからだ。

自由に物語ることで、もちろんリスクも負うことになる。読者は私が自身の仕事を他のだれよりも重要だと見なしているという印象をもつことだろう。それは真実ではない。もちろん、私は自分の研究アプローチを信じている。さもなければ私は本を書くに値する自分なりの観点をもてない。しかし、自身が寄与したことだけではなく、別のアプローチをとった場合の長所短所を公平に評価しているとも信じている。何よりも私は量子重力論を研究する人々のコミュニティに属しているという特権を有している。もし、私が人となりを読者に伝える技量に恵まれた本物の作家であれば、私がこの世界でもっとも称賛する人びと、あらゆる機会をつかんで教えを請いたいと願う人びとを描こうとするだろう。だが、私の技量は及ばない。私は自分がよく知っている人びとやできごとについて物語るにとど

めた。

われわれの仕事が終わったとき、だれかが量子重力論の探究の歴史物語を記すだろう。私が信じるように数年以内か、あるいはもっと悲観的な同僚たちが期待しているように数十年先か、いずれにせよその物語には、勇気、知恵、ビジョンという人間の最良の美徳と、学界政治の儀式を通じて表現されるもっとも普通の霊長類の行動とが結びつけられるだろう。望むらくはその物語では、われわれの人間的な職業の二つの側面が正しく書かれていてほしい。

この先、各章はそれぞれ、われわれの量子重力論探究に一章ずつ捧げられる。まず、空間、時間と宇宙の本性の探究に向かうアプローチ方法を決める四つの基本原理からはじめる。この準備をへて、量子重力論への三つの道で、これまでに到達した主要な結論を述べる。これらをあわせると、最小のスケールでは空間と時間がどのようなものかが見えてくる。そこから、この量子重力論の「現在のフロンティア」をめぐる旅に移る。まずホログラフィック原理と呼ばれる新しい原理を紹介する。これは十分、量子重力論の基本原理になりうる。つぎの章は、量子重力論へのさまざまなアプローチの議論が一つの理論にまとまり、おそらく予見可能な遠からぬ先に、空間と時間の本性をめぐる疑問に対して答えを出す可能性があることを述べる。そして、宇宙がいかに自然法則を選ぶかという問題に関

する考察で締めくくる。

では、第一原理からはじめよう。

1　宇宙の外部には何もない

人間はものをつくる動物だ。美しく精巧にできているものを見たときわれわれはほとんど本能的に尋ねる。「だれがつくったのか」と。われわれが宇宙に科学的に接近しようと考えるとき、学ばねばならないもっとも重要な教訓は、それは正しい問いではないということだ。宇宙が美しく精巧につくられていることは真実だ。だが、外部に存在する何かでつくられているはずがない。定義によって、宇宙は存在するすべてであり、その外部には何もないからだ。そして、定義により、宇宙の存在する前には何も存在しなかった。存在

するものは宇宙の一部でなければならないからだ。そこで、宇宙論の第一原理はこうなる。
「宇宙の外部には何もない」
これは宗教あるいは神秘主義を排除しようとするものではない。というのはそれを求める者にとっては、こうしたインスピレーションの種が割り込む余地はつねにあるからだ。しかしわれわれの求めるものが知識であるならば、もし宇宙は何であり、どうしてこうなったかを理解したければ、身の回りに見えるものについての疑問に答えを見つけなくてはならない。そしてその答えは、宇宙に存在するものだけにかかわるものでなければならない。

第一原理は、宇宙とは、そもそもの定義からして閉じたシステムであることを認めることを要する。それは宇宙内のものの説明には、同じく宇宙内に存在するものしか含みえないことを意味する。この点には非常に重要な意義がいくつもある。もっとも重要なものの一つは、宇宙内部のいかなる対象の定義あるいは記述も、宇宙にある他の事物に言及するしかない、ということである。もしあるものが位置をもつとすれば、その位置は宇宙における他の物事に関連してはじめて定義できる。もしそれが運動していれば、その運動はその位置が宇宙の他の事物に関してどう変化するかを眺めることによって識別できる。

だから、世界の実在の事物とまったく関係をもたない独立した空間には意味はない。空

間は空虚であったりものがいっぱいつまったりして、事物が出入りできる舞台ではない。空間を存在している事物と切り離すことはできない。空間とは事物のあいだに成り立つ関係の一つの側面にすぎないのだ。だとすれば、空間は文のようなものだ。単語が一つもない文について語るのは馬鹿げている。各々の文は語のあいだに成り立つ関係で定義される文法的構造をもっている。主語—述語あるいは形容詞—名詞といった関係だ。もし語をすべて取り出しても、空っぽの文は残らない。何も残らないのだ。その上、文法構造は多数存在し、語の異なる配列や単語同士のさまざまな関係に気を配る。使われている語や意味にかかわりなく、すべての文を成り立たせる絶対的な文構造のようなものはない。

宇宙の幾何学は文の文法構造に非常に似ている。文が単語同士の関係から離れて存在することも構造をもつこともないのと同様、空間は宇宙の事物のあいだに成り立つ関係を離れては存在しない。もし、いくつかの語を取り除くか、あるいはどちらかの順序を変えるかして文を変更すれば、その文法構造は変わってしまう。同様に、宇宙の事物がたがいの関係を変えれば、空間の幾何学は変わってしまう。

何もない宇宙について語るのは馬鹿げている。それは事物が一つしかない空間について語るくらい馬鹿げている。なぜなら、その一つの事物がどこにあるか定義しようにも参照すべき関係がないのだ（ここで文との類比は破れる。たった一語の文はありうるからだ。

しかし、一語だけの文の意味は通常、隣り合う文との関係から生まれる)。
どんな関係ももたない独立に存在するものとしての空間という見方は、絶対的な見方と呼ばれる。これはニュートンの考え方だったが、アインシュタインの一般相対性理論が実験的に立証されたことで決定的に否定された。だが、不幸なことにまともな職業的な物理学者のなかにも、空間と時間があたかも絶対的な意味をもつかのように世界を考える者が少なからずいる。
もちろん、空間の幾何学は動き回っている事物に影響されないように見える。私が部屋を横切った後、その内部の空間は依然、歩きはじめたときと同じように、学校で学んだユークリッド幾何学を満たしている。ユークリッド幾何学が身の回りに見えることのいい近似でなければ、ニュートンは成功するチャンスがなかっただろう。だが、実は見かけ上ユークリッド幾何学が成立している空間は、地球が平坦に見えるというのと同じで、幻想である。同じように、室内空間は、定規との食い違いが非常に小さいときにだけ、ユークリッド幾何学の規則を満たすように見える。しかし、非常に精密な測定ができれば、部屋のなかの三角形の内角の和はぴったり一八〇度にはならないことに気づく。その上、その和は実は、三角形と室内の物質との関係に依存する。もし十分精密に測定できれば、部屋内のすべての三角形の幾何学が、あなたが部屋の端から端へ移るにつれて変化することがわ

かるだろう。

それぞれの科学分野は一つずつ大切なことを人間に教え、いったいわれわれはだれか、そしてわれわれはここで何をしているのか、という物語をつくり上げるのを手伝う。たとえば生物学の教訓は自然選択だ。リチャード・ドーキンスやリン・マーギュリスなどの支持者が巧みに解説し、教えてくれたとおりに。私は相対性理論と量子論の主要な教訓は、世界とは、発展しつつある関係のネットワークに他ならないということだと信じる。私には相対性理論のドーキンスあるいはマーギュリスほどの雄弁がないが、本書を読み終えるころには、空間と時間の関係が、自然選択と同じくらいに根底的な意味を有していることが理解できるだろうと期待している。

チャールズ・ダーウィンの説は、われわれの存在が避けられないものではなく、必然的な永遠の秩序があってわれわれが宇宙に存在しているわけではない、と告げている。われわれはいくらか制御できる生命と社会という小さな側面よりも、はるかに複雑な予測できない過程（プロセス）の結果なのだ。世界が根底において、進化する関係のネットワークであることは、すべての事物について、小さかれ大きかれある程度まで真実である、とこの教訓は告げている。何が存在し、何が存在できないかを確定する、固定した永遠の枠組みは宇宙にはない。見えるものを除いて世界の先には何もない。その特定の歴史を除けば、

背景はない。

空間を「関係」から見るこの考え方は長いあいだ理想だった。十八世紀の初頭、哲学者ゴットフリート・ウィルヘルム・ライプニッツは、ニュートン物理学には致命的な欠陥があると力説した。それは論理的に不完全な空間と時間の絶対性を前提としているからだった。別の哲学者や科学者たちのなかにも批判者はいたが、十九世紀末にウィーンにいたエルンスト・マッハは批判の急先鋒だった。アインシュタインの一般相対性理論はこうした見解の直系の子孫である。

その混乱した一側面が、アインシュタインの一般相対性理論が、首尾一貫、物質を含まない宇宙を記述できることだ。となると、人はこの理論が関係をもとにしていないと思ってしまうかもしれない。なぜなら空間があって物質がなく、空間を定義するのに役立つ物質同士の関係がないからだ。だが、これは間違いだ。間違いは、空間を定義するのは物質粒子のあいだの関係でなければならない、と考えることにある。世界が粒子だけでつくられていないことは十九世紀の半ばから知られていた。二十世紀物理学を形づくったのはそれと反対の見方であって、世界は場からなっているというものだった。場は電場や磁場のように、空間にわたって連続的に変化する。

電場は場を生み出す物体を取り囲む力線のネットワークとして描くことができる（図1

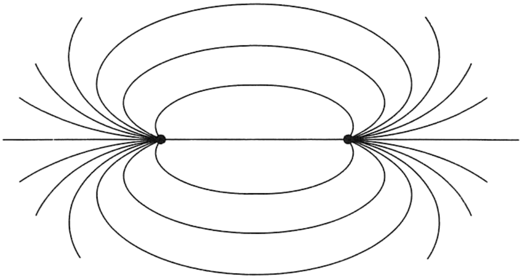


図1-1　正電荷および負電荷をもった電子のあいだの電場の力線。

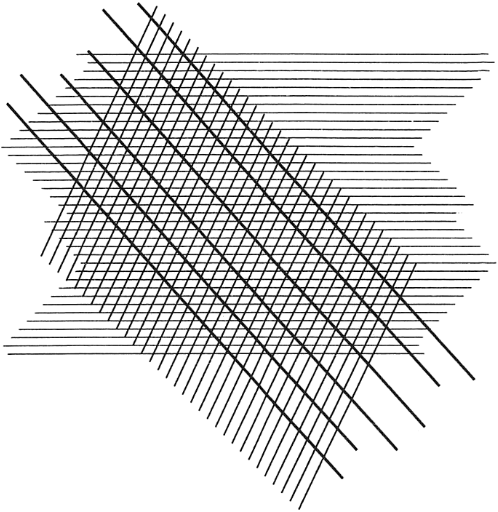


図1-2　重力場は電場に似ているが、それを記述するのに三組の力線が必要である。

－1)。この場をつくっているのは、あらゆる点を通る力線である（地図の等高線と同じく、線はある間隔でしか引かれていない)。もし電荷をもった粒子を場のなかのどこかの点に置くと、その点を通る力線にそって押される。

一般相対性理論は場の理論である。かかわっている場は重力場と呼ばれる。それは電場よりももっと複雑であり、もっと複雑な力線の集まりによって描き出せる。必要なのは図1－2に示されたように、三組の線である。われわれはそれらを異なった色、たとえば赤、青、緑で表すと想像しよう。三組の力線があるので、重力場はこの三組の線がたがいにどう結びついているかにかかわる、関係のネットワークを確定する。これらの関係はたとえば、三種のうちの一種が何回、別種のそれの周りで結び目をつくっているか、を用いて記述される。

事実、これらの関係が重力場のすべてである。リンクし、結び目を同じ仕方でつくる二組の力線は、同じ関係の組を表し、まったく同じ物理的状況を表す（図1－3に例を示す)。われわれが一般相対性理論を関係の理論と呼ぶのはこのためである。空間のなかの点はそれ自体では存在しない――一つの点がもちうる唯一の意味は、三組の力線のあいだの関係のネットワークを特徴づけるためにわれわれが名前として与えるものである。

これは一般相対性理論と電磁気学など他の理論との重大な相違の一つである。電場の理

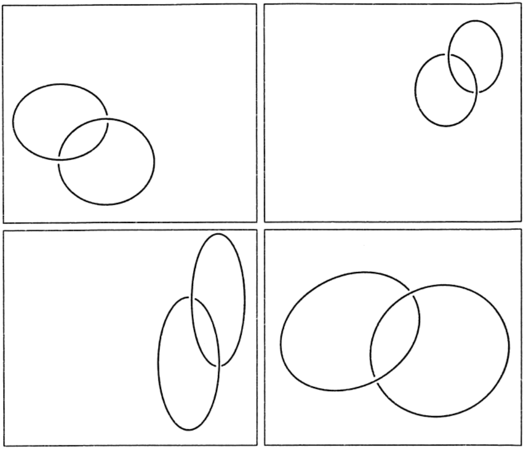


図 1−3　関係の理論では、問題になるのは力線のあいだの関係である。これらの四つの配置は等価である。どの場合にも、二つの曲線は同じ仕方でリンクしている。

論では、点が意味をもつことが想定されている。与えられた点を力線が通る方向に意味があるのだ。したがって、図1-4のように、二組の力線が一方が左側に一メートル動いたことだけが違う電場は、異なる物理的状況を表すと受けとられる。一般相対性理論を用いている物理学者はそうは考えない。彼らはある力線を一意的に区別している特徴を名付ける以外には、点について語ってはならない。一般相対性理論のすべての話は力線のあいだの関係についてだけである。

なぜ力線のネットワーク、フラックス（力束）を使い、すべてをそれに関連して定義しないのか。関係のネットワークが時間とともに変化するというのがその理由である。現実世界と何のかかわりもない理想化された少数の例を除けば、一般相対性理論が記述するすべての世界で、力線のネットワークはたえず変化している。

空間についてはしばらくこれで十分であろう。今度は時間に話を変えよう。同じ教訓が成り立っている。ニュートンの理論では、時間は絶対的な意味をもつとされている。それは無限の過去から無限の未来まで流れる。宇宙のどこでも同じで、実際に起きていることとなんら関係をもたない。変化は時間の単位で測られるが、時間は意味をもち、宇宙におけるどの特定の変化の過程をも超越した存在である。

二十世紀に、われわれはこの見方はニュートンの絶対空間の見解と同じように不正確だ

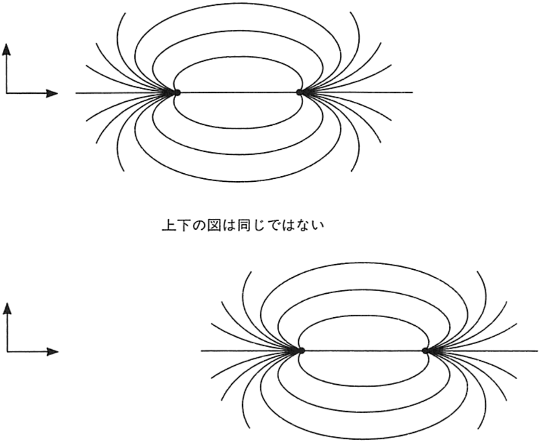


図1-4　非関係的理論では、力線が絶対空間のどこにあるかもやはり問題になる。

ということを知った。われわれはいまでは、時間もまたなんら絶対的な意味をもたないことを知っている。変化を離れて時間はない。変化する関係ネットワークの外部の時計といったものはない。だから、絶対的な意味であるものがいかに速く変化しているかと問うことはできない。われわれはただあることが、他のある過程の速さに対して、どれだけ速いか、比較できるだけである。時間は空間を記述する関係ネットワークにおける変化を用いてのみ、記述できるのである。

つまり、一般相対性理論では、何も起こらない宇宙について語るというのは不合理なのだ。時間は変化の尺度を除けば無である——それは他に意味をもたない。空間も時間も、宇宙を構成している進化するシステムの外部には存在しない。物理学者は一般相対性理論のこの特性を「背景独立」と呼んでいる。これにしたがえば、つねにすべての時間を通じて固定されたままである背景、舞台はないことになる。ニュートン力学あるいは電磁気学のような理論は、これとは対照的に「背景依存」である。いつ、どこ、をめぐるすべての問題に究極的な答えを提供する、固定した不変の背景の存在を想定しているからである。

なぜ量子重力論の構築にこれほど長い時間がかかったか。その理由はそれまでの量子論が背景依存だったためである。しかし背景独立な量子論を構築することがかなりむずかしいことがわかった。関係ネットワークを通じて確認されていることを除いて、量子論の数

学的構造は点に言及しない。空間と時間が関係のネットワーク以外の何ものでもない世界で量子論をどう構築するかという問題は、二十世紀の最後の一五年間に解決された。その結果生まれた理論がループ量子重力論である。これがわれわれの三つの道の一つである。それが何を教えてくれたかは第10章で述べる。そこにいたる前に、宇宙の外部には何もないという原理がもつ他の意味を探究しなければならない。

2 未来にはもっとわかるだろう

宇宙の外部に存在できないものの一つがわれわれ自身だ。科学では、観測者は研究しようとするシステムから引き離さなくてはならないという考えにわれわれは慣れている。さもないと、観測者自身が調べられているシステムの一部となり、完全に客観的な観点に立てないからである。また、観測者の行動と選択もシステムそのものに影響しそうである。観測者の存在がシステムの理解を乱し妨げてしまうのだ。

だから、研究しているシステムと観測者のあいだに明確な境界線が引けるようにするよ

うなシステムをできるだけ頻繁に研究するのがいい。物理学と天文学はこれができる科学であることから、「固い」科学と呼ばれている。つまり、社会科学よりも客観的で、信頼できそうだと主張されている。「柔らかい」科学では、科学者自身が自分の研究している社会に参加しているという事実を回避する術はない。もちろん、この影響を最少にすることは可能だし、良かれ悪しかれ、社会科学の方法論の多くは、観測者をシステムから取り除くことができればできるほど、それだけ科学的になれるという信念に立っている。

問題になっているシステムがたとえば真空チャンバー（室）あるいは試験管のように孤立しているときには、これでいい。しかし理解しようと目指しているシステムが全宇宙ならどうだろう？　たしかに影響していると判明し、このことが量子重力論のたぶんもっともむずかしい厄介な側面を引き起こすのである。

実際には、問題の半分は量子論とは何の関係ももたず、二十世紀初頭の二つのもっとも重要な発見をいっしょにすることから生まれたのである。最初の発見は、何ものも光より速く伝わることはできないということである。第二の発見は、宇宙は有限の過去につくられたようだというものである。最近の見積もりでは、宇宙がつくられたのは一四〇億年前だとされているが、正確な値は重要ではない。この二つの発見がいっしょになると、われわれには宇宙全体が見通せないことになる。われわれが見ることのできるのは、われわれ

を取り囲む一四〇億光年の範囲である——光がこの期間に伝わる距離だ。これは科学は原理的には、どんな問いに対しても答えを提供できるのではないことを意味する。たとえば、宇宙に何匹の猫がいるか、あるいは銀河はいくつあるか、といった問題だ。地球上にいるわれわれには、一四〇億光年よりも遠くにある銀河、遠くにいる猫から来る光も受け取ることはできない。だから、もしだれかが、宇宙には地球から見える以上に二一二、四〇〇、〇〇〇、〇四三匹の猫がいると主張しても、われわれの研究ではその正しさあるいは誤りは確かめようがないのだ。

しかしながら、宇宙はさしわたし一四〇億光年よりずっと大きいらしい。なぜそうなのかという話はさておいて、ここでは、宇宙に終わりがある、あるいは閉じているという証拠はまだ見つかっていないとだけ言っておこう。

アリストテレスの時代以来、数学者と哲学者は論理学を研究してきた。その目的はわれわれの推論の規則を確立することにあった。元来、論理学は、すべての言明は真か偽のどちらかであると想定してきた。いったんそう仮定すると、真なる言明を他の真なる言明から導き出すことができる。残念ながら、この種の論理学は全宇宙についての演繹をする段になるとまったく適用できなくなってしまう。仮に私たちに見える領域ですべての猫を数えたところ、その数が一〇億に達したとしよう。これは私たちが真であることを請け合え

る言明である。だが、「ビッグバンの一四〇億年後には、全宇宙に一〇〇兆匹の猫がいる」というような言明についてはどうだろうか。これは真かもしれないし、偽かもしれないが、地球で観測しているわれわれにはどちらとも判断がつかない。これらはすべてわれわれが述べることのできる主張であるが、われわれには真偽が決められない。どの観測者にせよ、宇宙における猫の数に関するどの主張が真であるか確証できない。猫が一つの惑星上で進化するにはほぼ四〇億年かかるから、いかなる観測者も、彼から遠く離れた別の場所で猫が進化して、神秘的な目から反射された光が自分のもとへ届いているかどうか知りえない。

しかし、古典論理はあらゆる言明が真か偽のどちらかであることを要求する。したがって古典論理はわれわれがどう推論するかを記述していない。古典論理が使えるのは宇宙の外部に住む人だ。全宇宙を見渡して、そこにいる猫をすべて数えることのできる生き物だ。しかしもしわれわれが宇宙の外部には何もないという原理に固執するなら、そのような生物は存在しない。だとすれば宇宙論をするためには別の論理――あらゆる言明が真もしくは偽であると判断できるとは考えない論理――が必要だ。この論理では、観測者が宇宙に関して下す言明は少なくとも三つのグループに分けられる。真であると判断できるもの、偽であると判断できるもの、それに現在の時点では真偽の判断がつかないもの、の三つで

ある。

古典的な論理観によれば、言明が真または偽のどちらに判断されるかという問題は絶対的なことである――それは言明だけに依存し、判断をおこなっている観測者にはよらない。しかしわれわれの宇宙では、正しくないことは容易にわかる。その理由はわれわれが先ほど述べたことと密接に関係している。個々の観測者が宇宙の一部から来る光しか見られない――どの部分が見えるかは、観測者がたまたま宇宙の歴史のどこにいるかに依存する。われわれはスパイス・ガールズに関する言明の真偽について は判断を下せる。だが、われわれから一四〇億光年のところにいる観測者にはできない。それは彼らがそのような現象の存在すらうかがわせるような、どんな情報も受け取っていないからだ。だから、ある言明の真偽を判断する能力は、ある程度まで観測者と言明の主題に依存していると結論しなければならない。

さらに、いまから一〇億年後の地球に生きている観測者は宇宙のかなり多くのことが見られる。なぜなら、われわれが一四〇億光年先までしか見えないのに、彼らは一五〇億光年先まで宇宙をのぞきこめるからだ。彼らはわれわれに見えることがみんな見えるだけではなく、もっと先まで見えるので、見えることもそれだけ多い（図2-1）。彼らにはより多くの猫が見えるのだ。したがって彼らに真偽の判断ができる言明のリストは、われわ

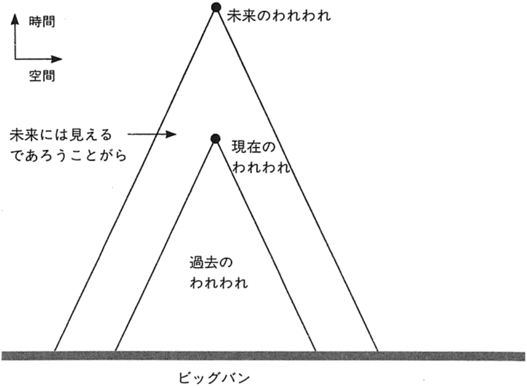


図2-1　未来の観測者はわれわれがいま見ているよりも多くのことが見られるだろう。斜線は、過去からわれわれのもとへ届く光の経路を表している。光より速いものはないので、われわれが見たり、経験したりすることは必ず二つの斜線に囲まれた三角形の内部にある。未来にはもっと遠くのものを受け取ることができるので、したがってもっと遠くを見ることができる。

れのリストをすべて含み、それよりも長い。あるいはわれわれと同じくビッグバンから一四〇億年たった宇宙に生きているが、われわれから一〇〇〇億光年離れたところにいる観測者を考えよう。大勢の宇宙研究者は宇宙はさしわたし少なくとも一〇〇〇億光年あると論じている。もしそれが正しければ、われわれからそんなに離れた観測者が知的でないとする理由はない。しかし彼らの見ている宇宙の部分は、われわれが見ている宇宙の部分と重ならない。彼らに真偽の判断がつく言明のリストは、ここ地球上で真偽の判断がつけられる言明のリストとは完全に異なっている。もし宇宙論に適用できる論理があるとすれば、どの言明を真偽と判断できるかは観測者に依存するように構成されていなければならない。すべての言明の真偽をすべての観測者が決定できると見なす古典的論理とは違い、この論理は観測者依存でなければならない。

物理学の歴史では、物理学者が新しい数学の必要性を理解できるようになった時分には、数学者がすでにそれに気づき、発明していた、ということがしばしばあった。量子論と相対性理論のために新しい数学が必要になったときに、まさにそのようなことが起き、数学が偶然そこに現れた。数学者たち自身にも必然性はあった。彼らは二十世紀を通じて、学校で学ぶ標準的な論理に代わる理論をもっぱら研究していた。そのなかには「活躍中の宇宙研究者のための論理」とでも呼ぶべき論理形式があった。そこにはわれわれが述べた特

性がすべて含まれていたのである。世界についての推論は世界内部の観測者によってなされるが、各観測者は自分のまわりを見回して観察したことから得た限定的で部分的な情報しかもっていない。その結果、言明はたんに真か偽、どちらかだけとは限らず、つぎのようなラベルを貼ってよいものもあった――「現在は真であるとはわからないが、将来はわかるだろう」。この宇宙論的な論理もまた本来的に観測者依存である。世界中の個々の観測者が世界の別々の部分を見ていることを認めているからだ。

数学者は、宇宙論のための正しい論理形式を発明したことに気づいていなかったらしい。それで彼らはその形式に別の名前をつけた。最初は「直観主義論理」と呼ばれた。最近まで研究されてきた進んだバージョンは、まとめて「トポス理論」と呼ばれている。数学的定式としては、トポス理論は決してやさしくない。おそらく私が出会ったなかでも、もっともむずかしい分野だ。私の知っていることはすべてフォティニ・マルコプールー＝カラマラに由来する。彼女は宇宙論が非標準的論理を必要としていることを発見し、トポス理論がそれに相応しい形式を備えていることに気づいた。しかし、トポスの基礎定理はわかりやすい。世界の実際の状況を描いたものだし、宇宙論以外にも使える。現実の世界では、われわれはほとんどつねに不完全な情報で推論をしている。われわれの知っていることだけにもとづいたのでは真偽が決定できない言明に、毎日のように出会っている。社会的お

よび政治的な分野では、われわれは異なる観測者が異なる情報に接することができるのを知っている。しばしばあからさまにである。われわれはまた未来に関する言明の真偽が、われわれの選んだことに影響されるという事実に毎日出くわす。

このことは論点全体に非常に重大な意味合いをもっている。つまり、われわれの決定の合理性を判断するとき、すべてを知っている超越的な存在がいると仮定する必要はなくなるのだ。異なる観測者に彼らの見たことを正直に報告するよう要求すれば十分だ。この規則が守られれば、われわれと別の人がたがいに十分な情報をもって、あるものが真か偽であるかを決定するとき、われわれはつねに同じ決定を下す。

哲学者たちは、倫理学と科学の根拠を、すべてを知っている存在の究極の判断にもとめるが、いま見たようにそれは間違いだ。われわれはすべてを見ている存在を信じることなく合理的に生きることができる。われわれは観測者として見たところを正直に伝えあうべきだとする倫理原則を信じればよい。もしこの原則をきちんと守れば、われわれにはつねに答えられない問いがあるという事実は、必ずしもわれわれが共有している世界の側面をいかに理解するかについて、合意に達することの妨げにはならない。

だからトポス理論あるいは宇宙論的論理もまた、人間世界を理解するための正しい論理なのだ。アリストテレスではなく、それが経済学、社会学および政治学の正しい基礎であ

る。これらの分野でトポス理論を取り上げて、自分たちの学問の基礎にしようとしている人がいるかどうか私は知らない。ジョージ・ソロスの経済学へのアプローチを彼は反射性理論と呼んでいるが、たしかに正しい方向を向いた出発点であろう。しかし、宇宙論と社会理論が同じ方向を指しているとしても、われわれは驚かないだろう。それらは意味のある定式化ができない二つの科学なのである。その基礎のなかに、すべての可能な観測者が彼らの研究するシステムの内部にいるという簡単な事実を組み入れないかぎり。

3　多数の観測者、多数でない世界

　ここまで私は量子論についてはまったく触れなかった。量子論に触れなくても、宇宙論を考えるには科学のやり方を根底的に変えなくてはならないことはおわかりいただけたと思う。論理の基礎にまでおよぶ改正が必要だ。各々の観測者は、世界について限られた量の情報しかもてないこと、観測者が異なれば、アクセスできる情報も異なることを知っておく必要がある。

「ちょっと待って！」読者の方々がこう叫ぶのが聞こえるようだ。「量子論が混乱のもと

じゃないか。私は宇宙全体に量子論をどう当てはめたらいいのか、考えるよう求められているんだね？　いったいどこからはじめたらいいんだ！」なるほどもっともな話だ。しかし、本章では、宇宙全体に量子論をどう適用するかを考えることは、量子物理学をやさしくすることはあっても、決してむずかしくはしないことをご説明しよう。

量子論で頭が痛いのは、それが理論と観測者の関係について標準的なアイデアに変更を迫るからだ。この理論はたしかに頭が痛くて、万人が認めることのできるような物理的解釈などない。実在およびそれと観測者との関係について、量子論は実際のところ何を主張しているのか。これには多数の異なる見解がある。たとえばアインシュタイン、ボーア、ハイゼンベルクおよびシュレディンガーといった量子力学の創始者たちも、この点に関しては一致した見解にはいたらなかった。現在の状態も少しもましになっていない。彼らはたしかに頭が良かったけれど、現在のようにさらに見解がふえるとはさすがに想像もできなかっただろう。今日では、量子論が何を意味しているかについて、一九二〇年代にアインシュタインとボーアがこの問題をめぐって最初に論争したとき以上に、意見が一致しないだろう。

量子論にはただ一つの数学的定式しか存在しないのは真実である。だから、それが何を意味するかで意見が一致しなくても、物理学者は何の問題もなく理論を用いて前に進むこ

とができる。奇妙に聞こえるかもしれないが、たしかにそうなのだ。私は以前、量子重力論のプロジェクトで仕事したことがある。万事順調にいっていたのだが、ある日、ディナーのときに共同研究者の一人と、量子論の意味に関する解釈が根本的に違っていることを発見して大騒ぎになった。しかしその後で、われわれが理論をどう考えようと、おこなっている計算に何の影響もないことを理解して冷静さを取り戻し、万事順調に戻ったのだった。

量子宇宙論は邪魔よりもむしろ助けになる。なぜならすぐわかるように、それは量子論に許される解釈の範囲を制限するからである。もし最初の二つの章で導入した原理に固執するなら、量子力学の解釈にいたるいくつかのアプローチは放棄しなければならない。あるいは量子論が空間と時間に適用できるという考えをそっくり投げ捨てなければならない。なにものも宇宙の外部にはないという原理と、未来にわれわれはもっと知っているだろうという原理が、量子論に関する旧来のアイデアの多くよりも、より単純でより合理的なものを探す新しい方法を指し示す。宇宙論に量子論を適用した結果、この数年で量子論の意味問題にとりくむ新しいアプローチが出現した。

通常の量子論は原子と分子の理論である。もともとボーアとハイゼンベルクが発展させた形式では、世界は二つの部分に分ける必要があった。一つは研究されている当のシステ

ムであり、これは通常の量子論を用いて記述される。もう一方の世界には観測者がおり、最初のシステムを調べるのに必要な測定装置を携えている。世界をこのように二つの部分に分離することは、量子力学の構造そのものにとって本質的なものである。この構造の核心にあるのが「重ね合わせの原理」であり、量子論の基礎公理の一つである。

最初にまずそれをきちんと述べてみよう。重ね合わせの原理では、もし量子システムに異なる性質をもつ二つの状態AとBがあれば、組み合わせaA＋bBにそのシステムが見いだされることも可能である、という。ここでaとbは任意の数である。このような組み合わせの各々は重ね合わせと呼ばれ、それぞれが物理的に異なっている。

だが、これは実際には何を意味するのか？　分解して考えてみよう。最初に理解しなければならないのは、「状態」とは何かである。この一語がほとんど量子論のミステリーをそっくり含んでいる。大まかにいえば、物理的システムの状態とは、特定の瞬間における構成要素の配置である。たとえば、室内の空気というシステムであれば、その「状態」とは室内の空気分子すべての位置とスピードと運動の方向を合わせたものである。株式市場というシステムでは、状態は特定の瞬間のすべての株の値段のリストである。つまり、ある状態とは、ある瞬間のシステムを完全に記述するのに必要なすべての情報で構成されたもの、と言うことができる。

しかしながら、このアイデアを量子論に用いるには一つ問題がある。というのは、われわれは粒子の位置と動きを同時に正確に測ることはできないからである。ハイゼンベルクの不確定性原理によれば、粒子の位置か、運動の方向と速さか、どちらかしか正確には測れないのだ。しばらく、なぜそうなのかと心配するのはやめよう。それはミステリーの一部である——そして正直に言えば、どうしてそうなのか、だれもほんとうには知らない。だが、そこから導かれた結論を見てみよう。

もし粒子の位置と運動をともに決定できなければ、先の「状態」の定義は役に立たない。ことによると、厳密な状態に対応する何かが実際にはあるかもしれないし、ないかもしれない。これは位置と運動の両者からなるが、不確定性原理によれば、たとえそれが理想的な意味では存在するとしても、われわれに観測できるような量ではない。だから量子論では、状態の概念を修正して、不確定性原理がもたらす制約にしたがいながら、できるだけ完全な記述を与えるようにする。位置と運動の両方を測ることはできないので、システムの可能な状態は、その位置の正確な記述か、あるいはその運動の正確な記述のいずれかを含むことはできても、両方ともにはできない。

ことによると、少々抽象的に聞こえたかもしれない。また想像しにくいかもしれない。心がどうしてもそのようには働かないからだ。不確定性原理のような原理は、論理的に終

わりまで考え抜くことがむずかしい。とくに最初にこの原理と出会ったときに、信じられないと感じてしまった場合にはなおさらだ。私自身もほんとうに信じたことはないし、そう感じるただ一人の物理学者だとも思わない。

もし私が不確定性原理に反することなく原子について語ろうとすれば、状態を私の捜し求めている情報のいくつかだけで記述できるものと考えなければならない。これが状態をめぐる最初の難事業である。状態がシステムの情報の一部しか含めないとしたら、その情報を選択する根本的理由がなければならない。しかし、不確定性原理は、状態がもちうる情報を制約しているにもかかわらず、どの情報を含めるべきか、どれを除くべきかは教えてくれないのである。

この選択の理由となるものはいくつか考えられる。それはシステムの歴史にかかわりがある。システムがいまおかれている文脈、たとえば宇宙の他の事物とどのように関連しているか、あるいはどのように相関しているか、ともかかわりがある。あるいは、観測者であるわれわれがおこなった選択とかかわりがありうる。もしわれわれが異なるものの量を測定することを選べば、あるいはある状況下で異なる質問をすることを選ぶだけで、状態に影響を与えるだろう。こうしたすべての事例で、システムの状態はただたんに与えられた時刻のシステムの性質にとどまらず、その過去あるいは現在の文脈とかかわっている。

これで重ね合わせ原理について話をする用意ができた。あるシステムは状態AとBにあることができるし、aとbを数としてそれらの組み合わせaA＋bBでも現れるというのは、どういう意味なのか？

例で考えるのがもっともいい。マウスを考えよう。猫の立場に立てば、二種類のマウスがいる――美味(うま)いのと不味(まず)いのとだ。その違いはわれわれには謎だが、どの猫にも見分けがつくらしい。問題はそれを告げる唯一の方法が食べてみせるしかないことだ。通常の猫族の経験からみれば、どのマウスも美味しいか不味いかだ。だが、量子論によれば、これは世界の実際のあり方に関する非常に粗っぽい近似である。ニュートン物理学が提供する理想化されたマウスとは反対に、実際のマウスは一般的に美味くもなければ不味くもない。それはその代わりに、美味いか不味いかという確率――たとえば八〇パーセント美味しくある機会――をもっていられる。このような量子状態は美味しい傾向と、もう一つの不味い傾向をもつものとして記述される。言いかえると、それは二つの状態――純粋な美味しい状態と純粋な不味い状態――の重ね合わせである。この重ね合わされた状態は数学的には、ある大きさを別の大きさに加えることで記述される。各々の比率は、食べられたときに哀れなマウスが美味しいと判明するか、その逆と判明する確率と関係している。

これはクレイジーに聞こえるし、三〇年間それについて学習した後でも、私はこの状況

を不安の感情なしでは説明できない。この事態を理解するよりよい方法が、たしかにあるはずだ！　それを認めるのはきまりが悪いが、だれもまだ理解可能なエレガントな仕方でそれを納得する方法を見つけていない。

量子論の問題は、われわれの経験には、この理論が述べているようにふるまうものが他にないことだ。われわれの知覚はすべて、あれかこれかである——AかB、美味いか不味いか。決してa×美味い＋b×不味いのような知覚の組み合わせはないが、量子論はこれを考慮に入れる。われわれが観測するのは、ある割合で時間の一部分は不味くて、残りの時間は美味しいというのだ。われわれがこの二つを観測する確率は、相対的な大きさa^2とb^2で与えられる。しかし、もっとも決定的なのは、システムの状態aA＋bBが、ある確率でAであり、ある確率でBであるといった、AかBのどちらかを意味するのではない点である。

ここにパラドックスがある。私の猫を量子論の言葉で記述できるとしたら、猫が味見した後ではマウスは美味しいか不味いかのどちらかである。しかし量子力学によれば、楽しいあるいは楽しくないという確定した状態はない。マウスはそのありうべき状態を鏡写しにした二つの状態の重ね合わせに入れられる。マウスは幸せな状態と不味いマウスとして食べられてしまう悩ましい状態の重ね合わせに宙ぶらりになるだろう。

だから猫自体は確定した状態を経験するが、量子論の光で照らしてみれば猫が重ね合わせに入っているのが見られるはずだ。さて、私が猫を観測すると何が起こるか？　猫が喉を鳴らすか、引っかくかするのは確実だ。だが、私は確定的にこれら二つの可能な状態のどちらかにあるだろうか？　私にはどれか一方を経験しないことは、想像できない。私はこれかあれか以外の何かを経験することが何を意味するか、想像だにつかない。しかし、量子論の言語で記述されれば、私もまた、マウスや猫と並んで二つの状態の重ね合わせに入るだろう。一方では、マウスは美味しく、猫は幸せで、私はごろごろ喉を鳴らすのを聞く。もう一方では、マウスは不味く、猫は不幸せで、私は引っかき傷の手当てをする。

理論に整合性をもたせているのは、異なる状態が相関していることである。私が幸せであることは、猫の幸せとマウスの美味しいこととといっしょである。もしある観測者が私と猫に尋ねたとしても、われわれの答えは終始一貫するだろうし、もし猫がマウスを味わえば観測者の経験とさえも首尾一貫するだろう。しかし、われわれのだれ一人、確定的な状態にいない。量子論によれば、われわれはすべて二つの可能な相関的な状態の重ね合わせにある。見かけ上のパラドックスのルーツは、私自身の経験があれかこれか一つのことであるのに対し、量子論で他の観測者がしばしばおこなう私の記述は、私が実際に経験しない重ね合わせだということだ。

このミステリーにはいくつかの解答が可能だ。一つは心的状態の重ね合わせが不可能であることについて、私が単に間違っていることである。事実、もし通常の量子力学の定式化が物理的システムとしての私に適用されれば、これはまさにそのとおりである。しかし、もし人間が量子状態の重ね合わせになれるなら、同じことが惑星地球にも言えるのではないか。太陽系は？　銀河系は？　実際、なぜ宇宙全体が量子状態の重ね合わせであるという物理的な可能性はないのか？　一九六〇年代以来、宇宙全体を、あたかも原子の量子状態を扱うのと同じ仕方で扱おうという試みがあった。量子状態を用いたこの宇宙の記述では、宇宙は光子と電子の状態のように、簡単に量子重ね合わせに入れられると想定されている。それゆえこの方法は「慣習的量子宇宙論」と呼ばれ、まもなく出会う量子論と宇宙論を組み合わせたその他のアプローチとは区別される。

私の見たところでは、慣習的量子宇宙論はまだ成功していない。おそらく判断として、これは厳しすぎるだろう。この分野で私がもっとも尊敬している人たちは私のこの見解に賛成していない。この事態に対する私の見解は経験によっても反省によっても形づくられてきた。たまたま私は、宇宙の量子論を定義した、最初の現実的な解答の発見に一役買った。これらはウィーラー＝デウィット方程式あるいは量子束縛方程式と呼ばれている。これらの方程式の解答は、全宇宙の記述を意味する量子状態を確定する。

私は最初、友人テッド・ジェイコブソンと仕事をし、つぎにもう一人カルロ・ロヴェリと仕事をして、一九八〇年代の終わりに、これらの方程式の無限個の解を発見した。これはたいへん驚くべきことだった。というのは、理論物理学の方程式で精密に解けるものはきわめて少ないからだ。一九八六年二月のある日、テッドと私はサンタ・バーバラで研究をしながら量子宇宙論の方程式の近似解を見いだそうとしていた。二人の友人アミタバ・センとアブヘイ・アシュテカーの美しい結果のお陰で、方程式を単純化できた。こうして突然、われわれは前に置かれていた黒板に書いた推測のうち、二番目か三番目かで、方程式を正確に解いてしまったのだった。私はあの日の黒板をありありと思い出せる。晴れた日だった。テッドはTシャツを着ていた（サンタ・バーバラはいつも晴れていて、テッドはいつもTシャツを着ていたが）。これが一〇年かかる旅の第一歩だった。

われわれが格闘していたことがらのなかには、量子宇宙論における観測者が宇宙の内部にいるという事実があった。問題は、量子論の従来の解釈ではすべて、観測者はシステムの外部にいると想定されていることだった。宇宙論ではそうはいかない。これがわれわれの原理であり、もしわれわれがそれを考慮に入れなければ、何をしようと実際の宇宙とはかかわりがない。

全宇宙の量子論に意味をもたせるために、この分野の先駆者フランシス・エヴェレット

とチャールズ・ミスナーらがいくつかの異なる提案をしている。若い理論物理学者たちは、量子宇宙論のためにつくったさまざまな提案の長所や不合理性を何年間も論じ合いながら楽しんできた。

だが少なくとも私にとって、基礎の心配をするより方程式を解く方が、真の進歩を導くことに通じる戦略だった。私は大学での数年間を、部屋の隅っこで、量子世界ではいったい何がほんとうなのか、と考え込んですごしたものだった。ところが事情はすっかり変わってしまった。量子重力の真の方程式には即座に無限個の解が出てしまったのだ。いくつかは非常に簡単であるとしても、大部分は極端に複雑で、想像もつかないほど込み入った結び目だった（たしかに、それらは結び目の結わえ方とも多少かかわるが、それについては後ほど話すことにしよう）。

徹底的な近似以外には、これらの方程式の意味はだれも考察してこなかった。あるいはできなかった。これらの近似では、宇宙の複雑さと驚異が一つあるいは二つの変数に切り詰められる。宇宙はなんと大きいか、宇宙はなんと速く膨張しているか、といった具合だ。宇宙における人間の位置を忘れがちで、宇宙の歴史をヨーヨーで遊ぶのに似た簡単なものに変えてしまい、宇宙の外部にいるかのような幻想に落ち込む。

必要とされているのは、観測者が量子システムの一部であることを包含する、量子理論

における状態の解釈である。検討中のアイデアの一つは、大きな影響力を振るった一九五七年のヒュー・エヴェレットの学位論文だった。彼は相対状態解釈と呼ばれる方法を発明したが、これでたいへん興味深いことができるようになる。もし正確に何を尋ねたいかがわかっていて、それを量子論の言葉で表現することができれば、たとえ測定装置が量子システムの一部であっても、異なる答えの確率を導き出すことができるだろう。これは前向きな一歩だが、依然、観測が理論に占める特殊な役割はほんとうには除去されていない。特に、これは尋ねてもよい疑問の無限の集まりに等しく応用できるが、そのすべては理論の立場から見ると数学的に等価である。大きな物体を用いておこなう観測は、明確な位置と運動をもつように見えるが、なぜそれが特殊であるかを告げるものは理論にはない。われわれの経験する世界を、世界の込み入った重ね合わせでつくられた無限個の他の世界から区別するものは何もないのだ。

われわれは物理理論が異なる世界を無限に記述できるという考えに慣れている。これはその応用におびただしい自由度があるからである。ニュートン物理学は法則をわれわれに与え、その法則にもとづいて粒子が動き、たがいに相互作用するが、これ以外には粒子の配置を指定することはない。宇宙を構成している粒子の任意の配置とそれらの初期の運動の任意の選択が与えられれば、ニュートンの法則を未来の予測に用いることができる。こ

うして、これらの法則はそれにしたがって運動する粒子からなるどの可能な宇宙にも適用できる。ニュートン理論は、無限個の異なる世界を記述する。それぞれが理論の異なる解答によって連結され、それらの世界は異なる位置にある粒子から出発することで到達できる。しかしながらニュートン理論では各々の解答が単独の宇宙を記述する。この点が、量子宇宙論への慣習的アプローチの方程式から出てくるように見えるものと非常に異なる。慣習的量子宇宙論では各々の解はその内部に無限個の宇宙の記述を含んでいるらしい。これらの宇宙は、理論が問いに与える答えだけではなく、尋ねられた問いによっても異なる。

エヴェレットの相対状態形式の理論はしたがって、なぜわれわれの観測するものがある質問の答えに対応するか、そしてなぜその他の無限個の問いの答えに対応しないかについての理論で補充しなければならない。何人かの研究者はこれにとりくみ、「デコヒーランス」と呼ばれるアイデアを用いていくらかの進歩を収めた。一組の質問は、もし一方の確定した答えが他方の確定した答えの重ね合わせである可能性がなければ、デコヒーラントと呼ばれる。このアイデアは何人かの人たちによって「無矛盾歴史定式化」と呼ばれる量子宇宙論のアプローチへと発展した。このアプローチは、宇宙の歴史に関する一連の疑問を明確にする。質問がたがいに無矛盾、つまりある質問の答えが別の問いを立てることを妨げないと想定するだけで、このアプローチはどのように異なる可能な答えの確率を計算

したらいいのか、教えてくれる。これは進歩だが、それほど遠くへは進んでいない。われわれが経験する世界はデコヒーラントであるが、二人のイギリスの若い物理学者フェイ・ダウカーとアドリアン・ケントが説得力をもって示したように、無限個の他の可能な世界もデコヒーラントなのだ。

科学におけるキャリアのうちで私が経験したもっともドラマティックな瞬間は、一九九五年の夏、イングランドのダーハムにおける量子重力論会議でこの研究が発表されたときだった。フェイ・ダウカーが彼女の無矛盾歴史定式化について発表しはじめたとき、そのアプローチは量子宇宙論の問題を解決する最良の希望と見なされた。彼女は量子宇宙論に対する無矛盾歴史アプローチの発展の先駆けをつとめたジェイムズ・ハートル指導下のポストドクだったが、彼女のイントロダクションにはこの先に来るものの示唆はほとんどなかった。その風格のある発表のなかで彼女は理論を組み立て、ついでにもっとも頭の痛い側面をいくつか解明した。理論はかつてない良い形のように見えた。その後、二つの定理を彼女は進んで証明したが、その解釈はわれわれが思っていたことには触れなかった。われわれが観測している「古典的」世界は粒子が確定した位置をもっているが、それがこの理論の解答によって記述される無矛盾な世界の一つである一方、ダウカーとケントの結果だと他の世界もまた無限になければならなくなる。それればかりか、この瞬間まで古典的で

あったが、五分間の時間があればわれわれの世界に似ても似つかないものになってしまう無矛盾な無限個の世界が存在する。それ以上に厄介なのは、いまでは古典的な世界が、過去のある時点には古典的なものの重ね合わせの任意の混ぜ合わせだったことだ。ダウカーはもし無矛盾歴史解釈が正しければ、われわれは今日、化石が存在するからといって、一億年前、恐竜がこの惑星上をうろついていたと演繹する権利はないと結論づけた。

私は部屋にいたすべての人の代わりに弁じるわけにはいかないが、私の近くにいた人たちは私同様衝撃を受けた。その夏の終わりにジム・ハートルと交わした会話で彼は、彼とマレイ・ゲルマンが無矛盾歴史アプローチについておこなった仕事は、フェイ・ダウカーが語ったどの話とも矛盾しないと言い張った。ハートルらの提案が根本的な文脈依存を実在に課していたことを、彼らは十分知っていた。人はまず、問いかける質問を完全に明確にしなければ、どの物体の存在についても、どの言明の正しさについても意味のある話はできないのである。まるでその質問によって実在が存在できるようになるかのようだ。もし最初に、一億年前に恐竜が地球をうろついていたかということを含めて、世界の歴史に関する問いを発しなければ、恐竜——あるいは任意の大きな「古典的物体」——という概念が意味をもつような記述はなくても済んだかもしれないのだ。

私も検証してみた。そしてハートルは正しかった。彼とゲルマンが語ったことはいまで

も通用する。興味深いことが起きたらしいが、いまにして思えば少しも異常なことではない。この問題に取り組んでいる多くの人たちが、ゲルマンとハートルを誤解して、彼らが実際に提案していた以上に、古典的で旧式の、直観にとってはるかに過激でない、はるかに居心地のいいものを意味すると解釈してしまったのだ。その解釈によれば、世界には一つの歴史があり、そしてそれは量子言語で表現されている。しかしこの一つの世界が多数の異なる、同等に無矛盾な歴史を含んでいるし、その各々は正しい問いによって生み出される。われわれのような観測者は二つ以上の歴史を経験することはできないという意味で、各々の歴史は他の歴史と両立できない。だがそれぞれの歴史は、この定式化によれば、同じように実在するのだ。

想像がつくだろうが、どう理解するかについては、だいたい友好的なものであっても巨大な不一致がある。ある者たちは、フェイ・ダウカーとアドリアン・ケントの確信にしたがって、実在概念がこのように無限に膨張するのは受け入れがたい、全宇宙に適用したときの量子力学は、間違っているか、もしくは不完全であり、どの問いの集まりが実在に対応するかを示す理論によって補足すべきだ、とした。ジェイムズ・ハートルとマレイ・ゲルマンに賛同し、この定式化とともに現れる極端な文脈依存を受け入れる者たちもいた。クリス・イシャムの言うように、問題は「ある」という言葉の意味にあったのである。

これでもまだややこしさが足りないかのように、量子宇宙論の慣習的な定式化は他の困難を伴っている。われわれは任意の一連の問いを自由に立てることはできないことが判明している。その代わりに、これらはある一定の方程式の解答でなければならないという制約がついている。宇宙の量子状態を決定する方程式をわれわれは解いてきたが、理論についてどんな問いが立てられるかを決定する方がはるかにむずかしい。これは到底できるとは思えない——少なくともどの実在の理論でもそうだ。小さいヨーヨーに似たバージョンの宇宙を記述する玩具モデルとは違うのだ。状態を決定する方程式が解けることそれ自体が全くの偶然事であるとすれば、正しい問いのセットが見つかりやすい、とおそらく論評してはならないだろう。それでもわれわれは試したし、もっと頭のいい多くの人たちも試した。そしてわれわれは全員、これは動かせる岩ではないという結論に到達した。このように、慣習的量子宇宙論はどうやら、答えは定式化できるが、問題は定式化できない理論であるらしいのだ。

もちろん、前章の見通しからすれば、これは驚くことではない。宇宙論を定式化するには、観測者が異なれば、見えるものはそれぞれ一部は異なり、また部分的でしかないことを認めなければならない。ここから考えると、宇宙全体をあたかも、普通の量子論が適用できる実験室内の量子システムであるかのように扱うことは意味をなさない。ある観測者

から見た領域に量子状態がぴったりとあてはまるような、別の量子論がありうるだろうか？　ありうるとしたらそれは慣習的量子論とは異なるだろう。それはある意味では、理論を「相対化」する、つまり量子論をもっとあからさまに宇宙の内部における観測者の位置に依存させてしまうことになる。それは大きな、たぶん無限大の量子世界の集まりを記述し、その一つ一つが、宇宙の歴史の特定の場所と時間に、特定の観測者に見える世界の部分に対応する。

ここ数年のあいだに、このような新種の量子宇宙論についての提案がいくつかあった。そのなかの一つは無矛盾歴史アプローチから育ってきた。それはクリス・イシャムと彼の協力者ジェレミー・バタフィールドによる一種の再定式化であり、そのなかで彼らは理論の数学的定式化の中心的な特性を文脈依存的なものにしている。彼らはトポス理論を用いてそれができることを発見した。これによって、一つの数学的形式に多数の相互連関した量子力学的記述が可能になり、その記述はどの文脈を選択するかによって異なる。彼らの仕事は見事だが、ヘーゲルあるいはハイデガーのような哲学者がむずかしいのと同じようにむずかしい。もし実在の観念が話をする人の文脈に依存しているのがほんとうであれば、世界について語るのに用いる正しい言語を見いだすのはたやすくない。

われわれ量子重力論の研究者にとって、クリス・イシャムは一種の理論家中の理論家で

ある。理論物理学者の大部分は例を用いて考え、学んだものをできるだけ広く一般化しようと求める。クリス・イシャムは反対の方向に生産的に働ける数少ない人の一人である。彼はいくたびか重要なアイデアを非常に一般的な形で導入し、その教訓を特定の例に適用するのを他人に任せた。その一つがループ量子重力論を導き、カルロ・ロヴェリは彼の戦略が非常に一般的なアイデアで述べられているのを認めて、非常に具体的な言葉で成果を挙げるということもあった。いまもこうしたことが起きている。人びとはかれこれ一〇年近く、量子宇宙論における文脈依存について考えてきた。われわれはクリス・イシャムからこれをするのにどんな種類の数学が必要かを学んだ。

イシャムと彼の協力者ルイス・クレイン以前に、カルロ・ロヴェリと私は合理的量子論と呼ぶアイデアの異なるバージョンを発展させた。先の猫の例に戻せば、すべてのプレーヤーが文脈をもち、それがその記述する世界の部分を構成している、という考え方を基礎とする。マウス、猫、私、友人、それぞれのどの量子記述が正しいかを問う代わりに、われわれはそれらすべてを受け入れるべきだ、と論じた。多数の異なる可能な観測者に対応して、多数の量子論がある。二人の観測者が同じ問いを尋ねるとき彼らは同じ答えを得るはずであるので、それらはすべて相互連関している。クリス・イシャムと協力者が発展させたトポス理論の数学は、どんな場合に問題がもちあがっても、どうすればいいかを教え

てくれる。

第三の文脈依存理論を定式化したのはフォティニ・マルコプールー＝カラマラである。それは彼女の宇宙論的な論理に対する提案を量子論へ拡張したものだった。すると文脈は与えられた瞬間の観測者の過去であると判明する。これは量子論と相対性理論の見事な統一で、情報の伝達を決定する光線の幾何学がそれ自体の可能な文脈を決定するのだ。

これらの理論のすべてに、同じ宇宙についての量子記述が多数ある。その各々の量子記述は、宇宙を二つの部分に分割する仕方に依存する。一方が観測者を含みもう一方が観測者が記述したいものを含むように分けると、宇宙のそれぞれの部分の量子記述が得られる。各々は特定の観測者が見るものを記述する。これらの記述はすべて異なるが、たがいに無矛盾でなければならない。これは一つの量子記述をある一人の観点から導かれたものとすることで、重ね合わせのパラドックスを解消する。量子記述はつねに外部に留まっている観測者によってなされる、宇宙のいずれかの部分の記述である。このような記述はどれも状態の重ね合わせになりうる。もし私を含めたシステムを観測していれば、私が状態の重ね合わせにいるのを見るだろう。しかし、私は自分自身をこのような言葉では記述しない。なぜなら、この種の理論では観測者は決して自分自身を記述しないからである。

多くの研究者が、これは正しい方向に向かう確定的な一歩だと信じている。量子宇宙論

の一つの解答のなかで、多数の宇宙——多数の実在するもの——の存在について形而上学的言明を理解しようと試みる代わりに、われわれは量子宇宙論の一つの多元版を構成するが、そこには一つの宇宙しかないのだ。しかし、その宇宙には多数の異なる数学的記述があり、その各々は異なる観測者が周りを見回したときに見るものに対応する。どの観測者にも全宇宙が見えないので、いずれも不完全である。たとえば各々の観測者はその記述する世界から彼ら自身を除外する。しかし二人の観測者が同じ問いを立てたとき、彼らの答えは一致しなければならない。そして、私が明日を見渡すとき、過去が変化していることはありえない。もし私が今日、一億光年離れた惑星上で恐竜がうろついているのを見るならば、私がつぎの年その惑星からの信号を受けるときにも、彼らはまだそこをさまよっているはずだ。

われわれ同様、新しいアイデアを弁護する人はみな、スローガンと結果をひっくるめて意見を支持する。われわれのスローガンは「未来にはもっと多く知るだろう」と「宇宙の外部の一人の神話的な観測者が見る多数の宇宙よりも、大勢の観測者が見る一つの宇宙」だ。

4　宇宙は事物ではなく、過程である

だれかに向かってなぜ新しいガールフレンドあるいはボーイフレンドがそんなに可愛いのかを説明しようとし、そしてだれかが物わかりよくそれに耳を傾けている、と想像しよう。どうしてこういう場合の努力はうまくいかないものなのだろう。この恋人にはほかにない固有のすばらしさがあると直観的にはわかるのだが、それを言葉にするのはむずかしい。職業、趣味、ルックス、くせを説明するのだが、言いたいことがちっとも伝わらないらしいのだ。

あるいは、文化と国民性をめぐる果てしない議論に巻き込まれたとしよう。イギリス人がギリシア人と違うのは自明のように思える。ギリシャ人とイタリア人も全然似ていない。どちらもイギリス人とは同じようにかけ離れている。中国人はアメリカ人とは文化が異なり、その歴史も古いが、ある面では、精神的にアメリカ人に近いところもあるだろうか？ここにもまた何か真実はあるのだが、多くの人はそれを表現しようとすると、どうも言葉につまる気がする。

この苦境から抜け出すには簡単な方法がある――物語を語ることだ。もしわれわれの友人の生涯を、どのように育ったか、父母はだれでどのように成長したのか、どこで学んだか、過去の彼らの関係に何が起きたのか話せば、この友人がどういう人であるかを話すよりも、もっと大事なことを多く伝えることになる。同じことは文化についても言える。われわれが最近と過去の両者の歴史について何かを知るときに限り、なぜ人間が世界の異なる場所で少々異なって表現されるかについて、いくばくかの洞察が得られる。これは自明かもしれないが、なぜそうでなければならないのか？　物語を語らずには言い表せないほどむずかしい人物あるいは文化についてはどうか？　われわれは岩や缶オープナーのような物体の話をしているわけではない、と答えておこう。物体は、何十年たっても形はそんなに変わらない。それらはたいていの場合、それぞれ不変な属性の集まりで、静的な物体

として記述できる。しかし、人物あるいは文化の場合には、その歴史から切り離した静的な対象としては理解できない過程が問題になる。いまどうであるかは、どのようにしてできたかを知らずには理解不可能なのだ。

多くのことを教えてくれる物語について考えてみよう。物語を語るとき、余分な情報とは何か？　だれかについての物語を語るとき、われわれは一連のエピソードを述べる。これらのエピソードから、その人について何事かわかる。というのは、多くの物語を聞き、理解してきた経験をふまえ、人が成長する過程で起きたことが、どのような人物になるかに影響を及ぼしている、と信じているからである。また人の性格は、幸運に恵まれたにせよ恵まれなかったにせよ、彼がどのように状況に反応するかに、そして彼らがしたい、あるいはなりたいと求めていることに、もっともよく現れていると信じているからである。

物語を物語たらしめているのは、できごとのあいだの連関である。連関ははっきりと示されることもあるが、たいていはその必要もなく、われわれはほとんど無意識のうちにあいだを埋める。われわれがそうできるのは、過去のできごとがある程度まで未来のできごとの原因であると信じているからである。人はどこまで彼らに起きたことによって形づくられるかを論じることもできるが、因果律の重要性を実際に、そしてほとんど本能的に理解するには、必ずしも熱烈な決定論者になる必要はない。物語がこれほど有用なのは、因

果律を理解しているおかげだ。だれが、だれに、いつ、なぜ、何をしたかが興味深いのは、われわれが行動とできごとのつながりについて知っているからなのだ。

世界の歴史ができごとのランダムな集まり以上のものでなく、それらのあいだには因果関係が少しもないと仮定しよう。ものごとはただ起こる。その場所にはなにも残らない。家具、家、一切がただ生まれて消滅する。それがどういうものか、実際想像できるだろうか？　われわれの世界に構造をもたらし、朝、椅子とテーブルが夕べ置いたのと同じ場所にあるのを説明するのは、因果律である。

だから、世界のものごとにはどうやら二種類あるらしい。まず岩や缶オープナーのような物体があり、ただ存在していて、属性のリストによって完全に説明できる。もう一種類は過程としてしか理解できないものごとで、物語を語ることによってのみ説明できる。後者は、簡単な記述では決して十分ではない。物語が唯一の適切な記述方法である。なぜなら、人間や文化のような存在は実は事物ではなく、時間とともに繰り広げられる過程にほかならない。

ここに芸術作品のアイデアがある。だれもが見て愛した映画を選び、それから一〇秒ごとに一コマずつ抜き取って、スチール写真をつくる。これらを大きなギャラリーに時系列にそって並べる。人びとを招いて、一枚ずつスチール写真を見てもらう。これはおもしろ

いだろうか？ おもしろくはあるまい。人びとは最初のうちは少し笑うだろうが、すぐに飽きてしまう。映画を見るときに比べて、全体のつながりを見るのに長い時間がかからなくてもだ。もちろん映画を見るときには、われわれは運動を見るのと同じ速さで提示された静止映像の連続を見ている。これはときには、静止映像の連続が運動の幻想をつくりだすという言い方をするが、これは正しくない。静止画像そのものが幻想なのである。世界は決して静止していない——つねに運動しているのだ。写真がつくり上げた幻想は凍った瞬間という幻想だ。それは実在に対応するものがなく、それ自体も実在ではない。したがって、映画のなかで起きていることは、運動と変化からなる現実の世界が幻想の系列から再創造されたものであって、その逆ではない。

われわれ人間は変化を長時間保持する能力に惹かれるようだ。絵画と彫刻がたいへん魅力的でたいへん価値があるのは、停止した時間という幻想をもたらしてくれるからだ。しかし、時間は停止できない。大理石の彫刻は毎日同じに見えるが、決して不活性なものではなく、一つの過程にあるのだ。芸術家の技をもってしても過程を事物に変えることはできない。というのは、事物などはなく、人間の時間尺度ではゆっくり変化するように見える過程だけがある。

したがって、世界の事物には物体と過程という二つのカテゴリーがあるわけではない。

比較的速い過程と比較的緩慢な過程というにすぎない。短いものだろうと長いものだろうと、過程の唯一の説明として真に適切なのは物語である。

世界が物体からなっているという幻想は多数の古典的科学の理論体系の背景をなしている。仮にわれわれが特定の素粒子、たとえば陽子を記述しようとしているとしよう。ニュートンの記述方法は、それをある特定の瞬間でとらえる——空間のどこに所在しているか、質量と電荷はいくらか、等々。これは粒子の「状態」の記述と呼ばれる。だが時間は記述のどこにも入ってこない。時間は実はニュートン世界では選択可能な部分である。いったん状態が適切に記述されれば、その後で、時間を「入れ」て、それがどう変化するかを記述する。理論をテストするには、一連の測定をおこなう。各々の測定は、ある瞬間の凍りついた粒子の状態を明らかにすると見なされる。一連の測定は映画のスチール写真と同じだ——それらはすべて凍った瞬間である。

ニュートン物理学における「状態」の考え方は、古典的な彫刻や絵画と凍った瞬間という幻想を共有している。これが世界は物体から構成されているという幻想を生みだす。もしこれが世界のほんとうのあり方であれば、あるものの一次的記述はそれが「いかにあるか」であり、その変化は二次的なものであろう。変化は「いかにあるか」の交代以外の何ものでもない。しかし、相対性理論と量子論はそれぞれ、世界はそうではないと教えてく

れる。世界は過程の歴史だと告げる、いや、むしろ大声でわめきたてている。運動と変化は一次的である。何ものもないのだ、非常に近似的な一時的な意味でそうであることを除けば。いかにあるか、あるいは状態がどうであるかは幻想だ。それはある目的にとっては有用な幻想かもしれないが、しかし根本的に考えようとするならば、「ある」が幻想だという本質的な事実を見失ってはならない。だから、新しい物理学の言語で話そうとすれば新たに語彙を学ばなければならないが、そこでは過程が均衡よりも重要であり、先にくる。実際、すでに適切な、非常に簡単な言語が利用できるので、理解するのに何の困難もないのである。

この新しい立脚点に立てば、宇宙は多数の「できごと」からなる。できごとは過程の最小の部分、変化の最小の単位と考えることができる。しかしできごとを、他のことがなければ静的である物体に起こる変化と考えてはならない。それは変化であって、それ以上のものではない。

できごとの宇宙は関係の宇宙である。つまり、宇宙のすべての性質はできごとの関係を用いて記述できる。二つのできごとがもちうるもっとも重要な関係は因果関係である。これは先ほど示したように、物語の意味を理解するのに不可欠な因果と同じ観念である。あるできごとを仮にAと呼ぼう。他のできごとBが起きるにはAが必要だったとすれば、A

はBの原因の一部であるという。もしAが起こらなかったならば、Bは起こりえなかった。この場合、われわれはAはできごとBに対して「寄与している原因」であるという。できごとは一つ以上の寄与している原因をもちうるし、一つのできごとは一つ以上のさらなるできごとに寄与できる。

　どの二つのできごとが与えられても、三つの可能性しかない。AはBの原因であるか、BがAの原因であるか、どちらも相手の原因ではないか。第一の場合にはAはBの因果的過去にあり、第二の場合にはBはAの因果的過去にあり、第三の場合にはどちらも相手の因果的過去にない。これは図4-1に描かれているが、それぞれの点はできごとを表し、それぞれの矢印は因果関係を表す。こうした図は過程として描いた宇宙である。図4-2は多数のできごとからなり、もっと複雑な因果関係の集まりをもつ、もっと複雑な宇宙を表

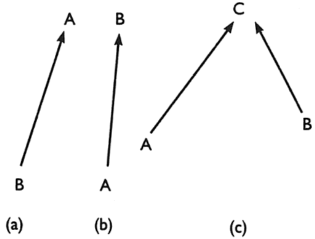


図4-1　二つのできごとAとBのあいだの三つの可能な因果関係。(a) AはBの未来にある、(b) BはAの未来にある、(c) AとBはどちらも互いに相手の未来にも過去にもない(たとえば図に示されているように、どちらもできごとCの過去にあるといったように、それらは他の因果関係をもつかもしれない)。

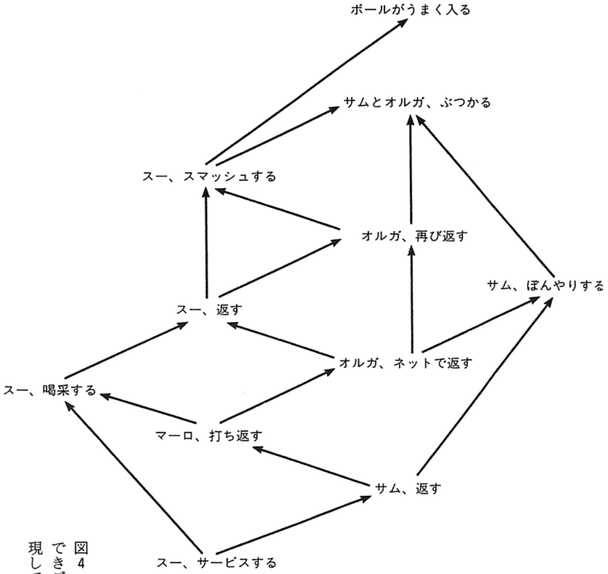


図4-2　テニスの球のやり取り。できごとのいくつかの因果関係を表現している。

している。これらの図は視覚的に語られた物語——宇宙の歴史のダイヤグラム——だ。

このような宇宙にははじめから時間が組み込まれている。時間と変化は選択可能な要素ではない。宇宙は一つの物語であり、過程で構成されているからである。このような世界では、時間と因果律は同義語である。あるできごとの過去という言い方は、それを引き起こした一連のできごとがなければ、意味をもたない。あるできごとの未来は、それが影響を及ぼせる一連のできごとを除いては、意味をなさない。われわれが因果的宇宙を扱うときには、したがって「因果的過去」と「因果的未来」を簡単に「過去」と「未来」と呼ぶことができる。図4-3は図4-2の特定のできごとの因果的過去と因果的未来を表している。因果的宇宙は一枚ずつ続く一連の静止写真ではない。そこには時間があるが、時間の瞬間についてほんとうの概念があるのではない。そこにあるのは因果関係によって一つずつ続く過程だけだ。このような宇宙が何であるかを言うのは無意味だ。もしそれについて語りたければ、その物語を話すしかないのだ。

このような因果的宇宙について考える一つの方法は、情報の移転を用いることだ。われわれは図4-1ないし図4-3の各々の矢印の内容をいくつかのビットの情報と考えることができる。そうすれば、各々のできごとはトランジスタに似ており、過去のできごとから情報を取り入れ、簡単な計算を施してその結果を未来のできごとに送ることになる。計

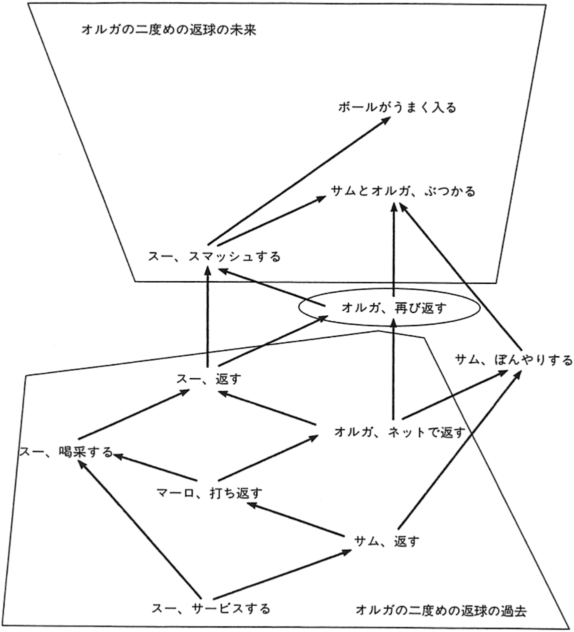


図4－3　オルガの二度目の返球の未来と過去。サムがぼんやりしているのはどちらのできごとの組にも属していないことに注意。

算は一種の物語であり、入ってきた情報がトランジスタのあいだでやり取りされ、ときには外部に出力される。もし近代的コンピュータから入力と出力を除いても、その大部分は際限なく動きつづけるだろう。コンピュータの回路をめぐる情報の流れは物語だ。できごとは計算で、因果関係はある計算からつぎの計算へと流れる情報のビットである。これはとても有用なたとえだ――一種のコンピュータとしての宇宙である。しかし、宇宙は、回路が固定されていない。回路は、情報の結果が流れるにつれて時間とともに発展するのである。

われわれの宇宙はこのような因果的宇宙だろうか？　一般相対性理論はそうだと言う。一般相対性理論が与える宇宙の記述はまさしく因果的宇宙のそれだった。なぜなら相対性理論の基本的教訓によれば、何ものも光より速く伝わることはできないからだ。具体的には、どんな因果的影響も情報も光よりも速く伝わることはできない。このことを心に留めて、図4-4に描かれた宇宙の歴史の二つのできごとを考えよう。最初をロックンロールの創造だとしよう。これはおそらく一九五〇年代にナッシュヴィルのどこかで起きた。第二のできごとを一九八九年のベルリンの壁の崩壊としよう。第一のできごとは第二のできごとに影響しただろうか？　ロックンロールの政治的および文化的影響について議論することができるだろうが、大事なのはロックンロールの創造がベルリンの壁の崩壊に通じる

できごとに、いくばくかの効果を及ぼしたことだけだ。最初に歓喜のうちに壁を攀（よ）じ登った人たちの頭のなかにはロックンロールがあり、またドイツの再統合に通じる決定を下した役人たちもそうだった。だから、一九五〇年代のナッシュヴィルから一九八九年のベルリンへ、たしかに情報の移転があった。

このように、われわれの宇宙では、因果的未来というものは光あるいは他の媒体を使って情報を送ることのできるすべてのできごとからなると定義していい。何ものも光より速く伝達できないので、できごとを離れ去る光の経路がそのできごとの因果的未来の外側の極限を確定する。これができごとの未来光円錐と呼ばれるものを形づくる（図4－5）。円錐と呼ぶのは、図4－5のように、空間が二次元になるように図を描けば、円錐のように見えるからである。あるできごとの因果的過去は、そこに影響を及ぼせたすべてのでき

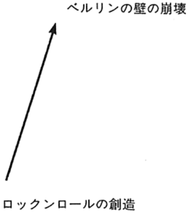


図4－4　ロックンロールの創造はベルリンの壁の崩壊の因果的過去にある。それは最初のできごとから第二のできごとへは情報が伝わることができるからである。

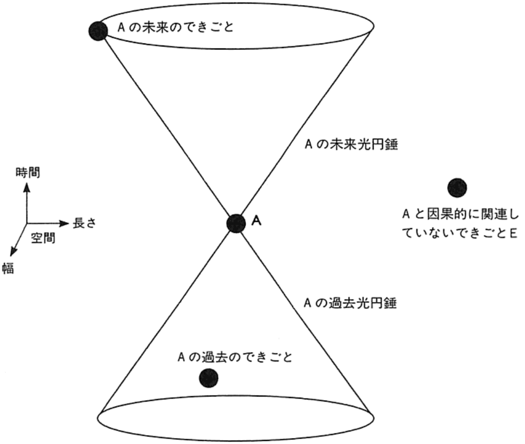


図4-5　できごとAの過去および未来光円錐。未来光円錐はAからAの未来にある任意の点にいたるすべての光信号の経路でつくられる。この円錐のなかにあるできごとは、因果的にAの未来にある。なぜなら、影響は光速以下の速さでAからその点に届くはずであるからである。Aの過去光円錐も見ることができる。これはAに影響できたすべてのできごとを含む。また、できごとEはAの過去にも未来にも入ってないことがわかる。なお、このダイヤグラムは空間が二つの次元をもつかのように描いた。

ごとで構成される。影響は過去のあるできごとから光速あるいはそれ以下で伝わるはずである。だから、あるできごとの外側の境界からあるできごとに到着する光は、あるできごとの過去光円錐と呼ぶものを形づくる。その一つを図4－5に描いた。どのできごとを取り巻く因果関係の構造も、過去および未来光円錐の両方を用いて描けることが見て取れる。また、図4－5から、特定のできごとの過去および未来光円錐の外部には多数のできごとがあることがわかる。これらのできごとはあまりに遠くで起きたために、光でさえ到達できないのである。たとえば、宇宙で最悪の詩人の誕生は、われわれから三〇万光年離れた銀河のある惑星で起きたが、幸い、われわれの未来および過去光円錐のどれにも入っていないといった具合だ。だからわれわれの宇宙では、あらゆる点を通るすべての光線の経路を、あるいは同じことだが光円錐を描くのは、すべての可能な因果関係の構造を記述する一つの方法である。これらの関係はいっしょになって宇宙の因果的構造を形づくる。

一般相対性理論の一般向け解説書の多くには、「時空の幾何学」についての話が多数含まれている。しかし、実際にはその大部分は因果構造とかかわりがある。時空の幾何学を構築するのに必要な情報はほとんど因果構造の物語からなっている。だからわれわれは因果の宇宙に住んでいるだけではなく、われわれの宇宙の物語のほとんどはできごとのあいだの因果関係の物語である。空間と時間がいっしょになって時空幾何学と呼ばれる幾何学

になるというたとえは、一般相対性理論の物理的意味を理解する上で実際にはそれほど役に立たない。そのたとえは数学的な偶然の一致にもとづいているが、これは数学を十分知っていて使える人にだけ役立つようなものだ。一般相対性理論の基本的アイデアは、できごとの因果構造がそれ自体、できごとによって影響されるということにある。因果構造はいつも固定しているのではない。それはたえず変化し、法則にしたがって発展する。宇宙の因果関係がどのように時間とともに成長するかを決定する法則はアインシュタイン方程式と呼ばれる。それはたいへん複雑だが、星や惑星のような大きなゆっくり動く物質の塊があるときには、かなり簡単になる。基本的にはそのとき何が起こるかと言えば、図4-6に示したように、光円錐が物質の方に傾く（これはしばしば空間と時間の湾曲、あるいは歪みと表現される）。その結果、物質が重い物体の方に落ちる傾向が生じる。これはもちろん、重力のもう一つの言い方である。もし物質が動き回れば、波が因果構造を通って伝わり、光円錐は図4-7に描いたように前後に振動する。これが重力波である。

だからアインシュタインの重力理論は因果構造の理論である。それによれば、時空の本質は因果構造であり、物質の運動は因果関係のネットワークが代わるがわる変化する結果である。因果構造の概念から残されたものは、何らかの量の物差しあるいは尺度である。われわれが電話で話をするとき、私に伝わる信号にどれだけのできごとが含まれている

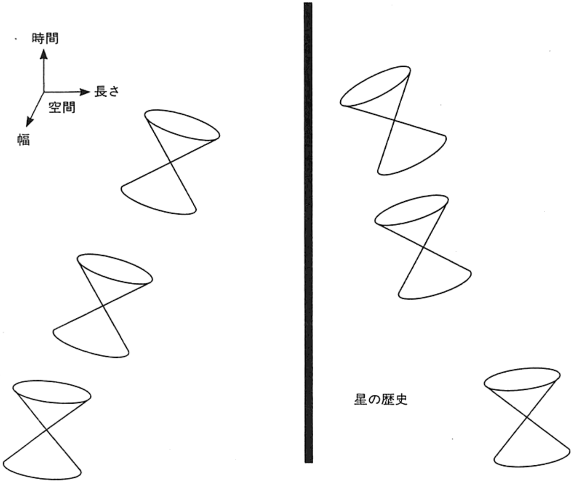


図4-6　星のような重い物体はその近くにある光円錐を自分の方に傾ける。これは自由に落下する粒子が物体に向かって加速するように見せる効果を引き起こす。

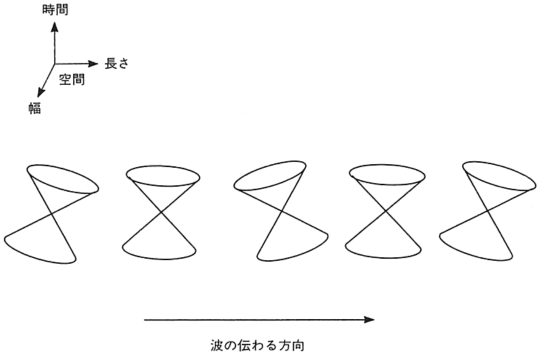


図4-7　重力波は光円錐が時空で指す方向における振動である。重力波は光速で伝わる。

か？　この文を読みおわるとき、この特定の瞬間の過去に宇宙の全歴史のできごとがいくつあるだろうか？

特定の過程にどれだけ多くのできごとがあるかという疑問には、二種類の答えがありうる。一つめの答えでは時間と空間が連続的だと見なされる。この場合には、時間は任意に細かく分けることができ、最少の時間の単位というものは存在しない。たとえば原子中の電子の運動だろうとなんだろうと、われわれはそれよりも一〇〇倍も速いものごとを考えることができる。ニュートン物理学は空間と時間を連続的と見なしている。しかし、世界は必ずしもそのようではない。もう一つの可能な答えでは、時間がばらばらの塊になっていて、数えられるものと考える。そうすれば、電話線で一ビットの情報を伝えるのにどれだけのできごとが必要であるかという質問への答えは有限である。それは非常に大きな数かもしれないが、依然として有限な数である。しかし空間と時間ができごとで構成されていれば、空間と時間そのものは連続的ではない。もしこれが真であれば、時間を際限なく細分することはできない。われわれは最終的にそれ以上分割できないできごとに出会うが、これらは起こりうるもっとも単純なできごとである。物質が数えられる原子でできているように、宇宙の歴史は莫大な数の要素的なできごとで構成されているのだ。

量子重力についてのこれまでの知見は、第二の可能性が正しいことを示唆している。空

間と時間の見かけの滑らかさは幻想なのだ。その背後には数えられるとびとびのできごとの集まりでできた世界がある。さまざまなアプローチがこの結論にいろいろな証拠を与えるが、世界を細かく見ていけば物質の滑らかさが分子と原子からなるとびとびの世界に取って代わられるように、空間と時間の滑らかさは、確実に消失するという点では一致している。

さまざまなアプローチはまた、要素的なできごとに出会うまでにどれだけ深く探らなければならないか、という点でも一致している。世界のとびとびの構造がはっきりしてくる時間と距離の尺度はプランク尺度と呼ばれる。それは重力の効果と量子現象の効果の重要性が等しくなるような尺度と定義できる。大きな物体では、量子論や相対性理論は忘れて差し支えない。しかし、プランク尺度まで下がればそれを考慮に入れる以外に選択肢はなくなる。この尺度で宇宙を記述するには量子重力論が必要なのである。

プランク尺度は既知の基本原理を用いて証明できる。それは基本法則に現れる定数を適切に組み合わせることで計算される。用いる定数として、量子論からはプランク定数を、相対性理論からは光速を、ニュートンの法則からは重力定数をもってくる。プランク尺度を用いれば、われわれは絶対的に大きい。プランク長さは10^{-33}センチメートルであるが、これは原子核よりも大きさにして二〇桁も小さい。プランク時間とは、大雑把に言えば、ほ

んとうに基本的なものが起こるのに要する時間で、10^{-43}秒である。この時間尺度では万事は信じられないほどゆっくりしている。われわれが経験するもっとも短い時間でも、10^{40}個以上の瞬間が含まれるのである。まばたき一回に含まれるプランク時間の数は、エベレスト山にある原子の数よりも多い。観測された二つの素粒子のあいだのもっとも速い衝突も、現在生きている全人類の脳内の総ニューロン数よりも多くのプランク時間を含んでいる。

この調子でどんどん進める。基本的なプランク温度がある。これはいかなるものもこれより高い温度に到達できないように見える。それと比較すればわれわれの経験にあるものは、星の内部でさえ、絶対零度を辛うじて越えるほどでしかない。すべての物質は温度を十分上げれば溶ける。もし世界のある領域がプランク温度に上げられたとすると、空間の幾何学の構造そのものが溶けてしまうだろう。このようなできごとが経験できる唯一の希望は、過去を覗くことである。というのは通常ビッグバンと呼ばれているものは、基本的な言葉ではビッグフリーズだからだ。世界を存在させているのは、たぶん爆発よりも、宇宙のある領域を過激に冷やし、フリーズさせるできごとであろう。空間と時間を自然な言葉で理解するには、われわれを囲む万物が凍る前に何があったかを想像しなくてはならない。

このようにわれわれの世界は基本的な世界に比べれば、信じられないくらい大きく、ゆ

つくりとし、冷たい。われわれの仕事はわれわれの狭い見方が押しつけた偏見と目隠しを取り除き、空間と時間を本来の尺度で想像することである。これを可能にする非常に強力なツールがある。それはこれまでに発展させた理論で構成されている。われわれはまず信頼できる理論を取り上げ、それにできるかぎりプランク尺度の描像を与えるようにする。この本で私が語る物語は、この方法で私たちが学んだものなのである。

ここまでの章で私が論じたのは、世界を独立した実体の集積として、空間と時間の固定した、静的な背景に生きているものとしては理解できないということだ。世界は関係のネットワーク、つまり各部分の属性がその他の部分との関係によって決定されるものである。この章では、世界をつくり上げている関係が因果関係だということを学んだ。これは世界は素材でできているのではなく、事物が起こる過程でできていることを意味する。素粒子はその場にじっとしているだけの静的な対象ではない。それは相互作用するできごとのあいだで少量の情報を運び、新しい過程を生み出す。それらは永遠のアトムという伝統的な描像よりも、コンピュータにおける要素的演算にはるかによく似ている。

周りを見渡し、それぞれの物体が目に見えるということは、その物体から目まで光子が届いた結果であると想像してみよう。目に見える各々の物体は光子の集まりという形で情報が伝わってきた過程の結果である。物体が遠ければ、光子があなたにたどり着くのに長

い間かかる。だから、あたりを見るとき空間を見ていない――その代わりに、宇宙の歴史を通して過去を見ていることになる。目に見えるものは世界の歴史の一断片である。見えるものすべては少量の情報を携えており、宇宙の歴史の小さな部分である過程を通して運んでいるのである。

世界の全歴史は莫大な数のこれらの過程の物語以外の何ものでもない。その関係はたえず発展している。われわれは周りの世界を静的なものとしては理解できない。それは莫大な数の過程がいっしょになって働いている、創造されたもの、連続的な再創造の最中にあるものと見なさざるをえない。世界はこれらの過程をすべてひっくるめたものである。私はこの言い方が神秘的に聞こえないことを希望する。私が上手く書いていれば、本書の終わりまでに、読者は宇宙の歴史とコンピュータにおける情報の流れのたとえが、もっとも合理的な、科学的類比だと気づくだろう。神秘的なのは、永遠の三次元空間のなかに存在し、想像しうるあらゆる方向に伸びている世界という描像である。そのなかでわれわれは現実に見るものを知的な構成物で置き換えてしまう。これはたんなる神秘的なビジョンではない。それは誤りなのだ。

5 ブラックホールと隠れた領域

現代の文化的図象学（イコノグラフィ）ではブラックホールは神話的対象となっている。SF小説やSF映画ではしばしば死と超越のイメージを引き合いに出し、ブラックホールを通ることの不可逆性と、そこを通り抜けて最終的にまったく新しい宇宙へ出ることに思いを向けさせる。私はたいした役者ではないが、一度だけ友人の監督マデリン・シュワルツマンに招かれて、彼女の映画に出演したことがある。幸運なことに私の役柄は物理学者で、黒板の前で講義をするというものだった。「ソマ・セマ」と題されたその映画では、

オルフェウス神話と現在の科学技術の重要なテーマが混ぜ合わされていた。核全面戦争とブラックホールだ。私の学生がオルフェウスの役を務めたが、彼女は音楽を通じて不可逆なものの三つのバージョンの例外になろうとする。

空間と時間について職業的に考えようとする人びとのあいだでは、ブラックホールは中心的な役割を果たしている。天文学者の一分野がまるまる、ブラックホールがどのように形成され、どのように見つけられるかを理解することに捧げられている。いまでは、何ダースというブラックホールの候補が観測されている。しかし、もっとも興奮を呼ぶのはたぶん、膨大な数のブラックホールが存在することだろう。たとえ大部分ではなくても、われわれの銀河を含めて多数の銀河が、その中心に太陽の何百万倍もある無数のブラックホールを抱えている。そして星の小さな割合が生涯をブラックホールになって終わるという証拠が、観測結果からも理論からもあがっている。典型的な銀河には、星がブラックホールになったものが何千万、いや何億個と含まれる。

ブラックホールが大衆文化で大きく取り上げられるので、たいていの人が大まかなことは知っている。ブラックホールは重力が非常に強く、脱出するには光速を超える速度が必要だ。だから光ですらそこから脱出できないし、他のものならなおさら出られない。密度がとても高いので、光円錐を大きく傾かせ、光はブラックホールから遠ざかるように動い

ても、実際には少しも遠ざからないのである（図5－1）。だからブラックホールの表面は一方通行の鏡に似ている。そこに向かう光は通過できるが、どの光もそこから脱出できない。その意味で、ブラックホールの表面は地平線と呼ばれる。その地平線がブラックホールの外にいる観測者が見ることのできる限界を表している。

この地平線がブラックホールを形づくる物体の表面ではないことを強調しておかなければならない。地平線は宇宙に光を送りだせる領域の境界にすぎない。地平線の内部にいるだれかが放つ光は重力に捕らえられてしまい、地平線の外へは届かない。ブラックホールを形成している物体は速やかに圧縮され、一般相対性理論にしたがって急速に無限大の密度に到達する。

ブラックホールの地平線の向こう側は、そこから情報を受け取れないにもかかわらず、進行中の因果過程が織りなす宇宙の一部である。このような領域は隠れた領域と呼ばれる。少なくとも宇宙には一〇億個のブラックホールがあるので、ある領域が隠れているか否かは、観測者次第というところもある。ブラックホールに落ちた観測者には、外部にとどまっている友人には見えないものが見える。第2章では、異なる観測者が宇宙の異なる部分の過去を見ることを知った。ブラックホールの存在は、これがたんに、遠方からの光が届くのを待てばいい問題ではないことを意味する。

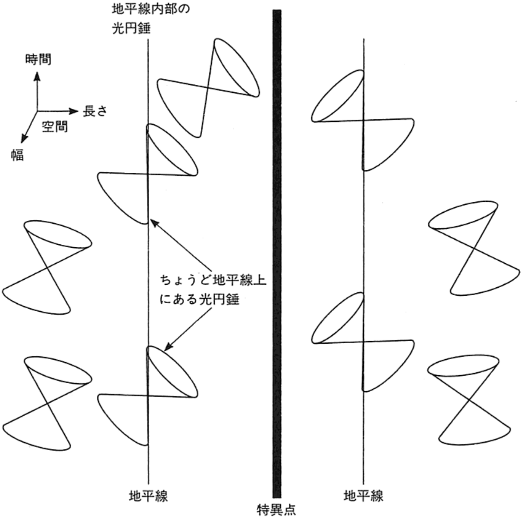


図5－1　ブラックホールの近傍の光円錐。太線は特異点であり、そこでは重力場は無限に強い。細い線は地平線で、特異点から等距離にある光線で構成されている。ちょうど地平線にある光円錐は傾けられて、それから離れ去ろうとしている光線が地平線から同じ距離を保ち、地平線に平行に伝わることを示す。もっと内部にある光円錐はもっと大きく傾き、未来に向かう運動はどれも特異点に近づいてしまう。

すべての観測者それぞれに隠れた領域がある。各々の観測者の隠れた領域は、いくら待っても彼らが情報を受け取れない、すべてのできごとで構成される。各々の隠れた領域は宇宙のすべてのブラックホールの内部を含むが、それと同時に他の隠れた領域も含まれるかもしれない。たとえば、もし宇宙の膨張が時間とともに速まれば、宇宙にはわれわれがいくら長く待っても光信号を受け取れない領域が存在する。このような領域からの光子がわれわれの方向に光の速さで伝わっても、宇宙の膨張速度が大きいためにつねに走った距離よりも、まだ走らなければならない距離が多く残ることになる。膨張が加速されているかぎり、光子は決してわれわれに届かない。ブラックホールとは違い、宇宙の膨張の加速が生み出した隠れた領域は、個々の観測者の歴史に依存する。各々の観測者に対して隠れた領域があるが、それらは観測者によって異なるのだ。

ここから興味深い哲学的論点がもちあがる。客観性とは通常、観測者の独立と結びついたものと考えられている。何であれ観測者ごとに違うようなものは主観的で、全然現実的でないことを意味すると普通、見なされている。しかし、観測者依存が客観性を排除するという思いこみは、古い哲学の名残である。この古い哲学は普通、プラトンの名と結びついており、それにしたがえば、真理はわれわれのこの世界にはなく、永遠に真であるすべてのイデアで構成される想像上の世界に宿っている。これによれば、いかなる人も世界の

真理を手にできるはずだ。なぜなら真理を見いだす過程というのは、観測するというよりも思い出すプロセスに近いものだからだ。この哲学とアインシュタインの一般相対性理論との折り合いをつけるのはむずかしい。相対性理論で定義される宇宙では、あるものが客観的に見ても真で、しかも同時に幾人かがそれを認めうるものであるとしても、それは限られた観測者だけであって、他の観測者にもそうであるとはいえないからだ。「客観性」は「万人が知りうる」とは同じではない。もっと弱い、それほど厳格でない解釈が必要である——客観性とは、ある観測の真偽を確言できる立場にいる者全員が、たがいに同意できるものである、と。

どの観測者の隠れた領域にも宇宙を見える部分と見えない部分に分ける境界がある。ブラックホールの場合と同じく、境界は地平線と呼ばれる。見えない領域と同じく、地平線は観測者依存の概念である。外部にとどまった観測者にとっては、ブラックホールには地平線——光が逃れられない領域と残りの宇宙を分ける曲面——がある。ブラックホールの地平線の内部にある点を離れた光は、否応なく内部に引きずり込まれる。地平線より少しでも外側にある点を離れた光は逃れることができる（図5－1および5－2）。ブラックホールの地平線は観測者依存の概念であるとはいえ、多数の観測者、ブラックホールの外部にいる人すべてが地平線を共有する。だから、ブラックホールの地平線は客観的な性質

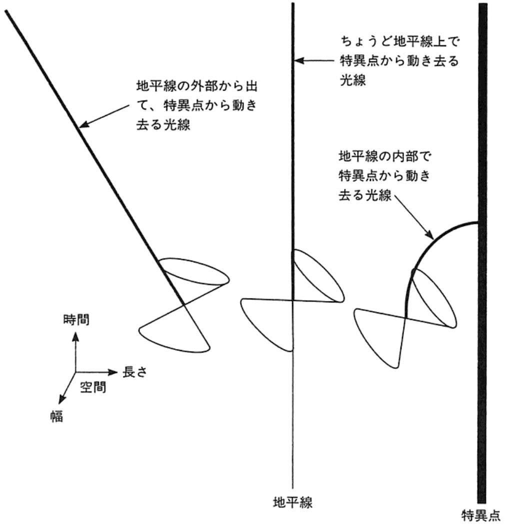


図5-2 特異点から遠ざかる三つの光線の経路。これらはそれぞれ地平線のすぐ内部、すぐ外部、それにちょうど地平線の上から出発している。

である。しかし、それはすべての観測者にとっての地平線ではない。なぜなら、地平線の向こうに落下した観測者は内部を見ることができるからだ。

地平線はそれ自体が光の曲面であることは知っておくと便利だ。それは観測者に届き損なった光線でできている（図5-2）。ブラックホールの地平線はブラックホールから外向きに動きはじめたが、ブラックホールの重力場のために、その中心から少しも離れることができないような光がつくる曲面である。

他方、ブラックホールのちょうど外側から出発した光子はわれわれのもとに届くが、地平線に近い光円錐はほとんど光が逃げられないほど傾けてあるので、遅れるだろう。地平線は遅れが無限大になる点である——放出された光子は決してわれわれには届かないのだ。

いまわれわれがブラックホールからある距離を隔てて上に浮かんでいると想像しよう。時計をブラックホールに落としてみる。その時計は、落ちながら一〇〇〇分の一秒ごとに光のパルスを出すようにしてある。われわれは信号を受け取り、それを音に転換する。最初は周波数一〇〇〇、すなわち一秒間に一〇〇〇パルスの信号を受け取るので、信号は高音（高ピッチ）で聞こえる。しかし、時計がブラックホールの地平線に近づくにつれて、パルスがわれわれのところに到達するのに要する時間が少しだけ余分にかかるという事実のために、個々の信号はますます遅れる。時計が地平線を越えるとき、ピッチはゼロに下

がり、それ以降は何も聞こえない。

これは光の振動数も地平線近くからはい上がってくるにつれて減少するということだ。このことは量子論からも理解できる。光の振動数はエネルギーに比例する。光子の出発点が地平線に近ければ近いほど、われわれに向かって旅をする間に、それだけ多くのエネルギーを放出する。つまり、われわれのもとに達するまでのあいだに、振動数はその分大きく減少する。もう一つ、振動数が減少するにつれて光の波長は伸びる。光の波長はつねに振動数に反比例するからである。その結果、もし振動数が減少すれば、波長は同じ割合で増大する。

しかし、これはブラックホールが光の波長を伸ばすことで一種の顕微鏡として働いていることを意味する。小さな尺度で見た空間は大きく異なったものに見えるだろう。空間は離散的かもしれない。これは幾何学がある絶対的な大きさをもった塊として現れることを意味する。あるいは、空間の幾何学そのものに量子不確定性があるかもしれない。電子が原子のなかの正確なある一点に局所化できず、原子核の周りで永遠にダンスを踊っているように、空間の幾何学がそれ自身踊り、ゆらいでいるかもしれないのだ。

われわれには通常、非常に小さい尺度で起きていることは見えない。その理由は、光の波長よりも小さいものを見るには光が使えないからだ。もし普通の光を用いれば、最高の

顕微鏡を使ったところで、原子の直径の数千倍も小さい対象を分解して見ることはできない。これは光のスペクトルの可視光線の領域にちょうど当たる。もっと小さいものを見るには、紫外線が使えるが、光の代わりに電子あるいは陽子を使ったとしても、空間の量子構造を見るのに要求される分解能には近づけない。

残念ながら、これまでのところブラックホールをつくるのは実際的でないとわかっているので、だれにもこの実験はできない。しかし、もしブラックホールのすぐ外側の領域から来る光を検出できれば、何が見えるだろうか。一九七〇年代の初期以来、それについていくつかのめざましい予測がなされてきた。これらの予測が相対性理論と量子力学の結びつきからはじめて得られる一連の教訓となる。では、つづく三つの章はこれらに捧げよう。

6 加速度と熱

ブラックホールが何であるかをほんとうに理解するには、それを間近で見ていると想像しなければならない。いま宇宙船でブラックホールの地平線のすぐ外でホバーしているとしよう（図6－1）。すると、何が見えるか？ ブラックホールは惑星や恒星のように、重力場をもっている。だからその表面のすぐ上にとどまるには、ロケットを吹かしつづけなければならない。エンジンを切れば自由落下の状態に入り、たちまち地平線を突き抜けてブラックホールの内部に入り込むだろう。これを避けるためにたえず加速しつづけ、ブ

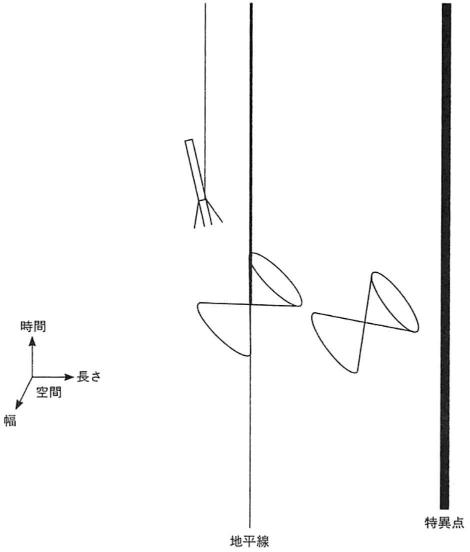


図6－1　ブラックホールの地平線のすぐ外に浮かんでいるロケット。エンジンを吹かしつづけることで、ロケットは地平線から一定距離を保ってホバーできる。

ラックホールの重力場に引きずり込まれるのを防がなければならない。しかし地平線はわれわれには見えない。なぜなら地平線は、こちらに向かって進んでいるがわれわれのところに到達できない光子でできているからだ。光子はブラックホールの重力場によってその場所にとどまっている。だからわれわれと地平線のあいだの物体から来る光は見えるが、地平線そのものから来る光は見えない。

これはどこかおかしいのではないか、と思われるかもしれない。われわれの方向に向かっていながらわれわれに到達できない光子でできた曲面の上を、ほんとうにホバーできるのか？　たしかにこれは何ものも光を追い抜けないという相対性理論と矛盾する。これはほんとうだが、注意事項がある。慣性観測者（つまり加速せず、一定の速さで動く観測者）は光につねに追いつかれる。しかし、絶えず加速していれば、十分遠い後方のある点から出発した光は、追いつけない。事実、これはブラックホールとは何の関係もない。絶えず加速している観測者は、宇宙のどんな場所にいても、ブラックホールの地平線のすぐ上でホバーしている人と同じ状態にある。これは図6－2から見て取れる。十分な大きなリードをあらかじめ取っていれば、光子は加速している観測者を追い越せない。光子が追いつけないという事実のために、加速している観測者には、隠れた領域が生まれる。そして地平線もある。つまり隠れた領域の境界だ。境界線は追いつく光子と追いつかない光子

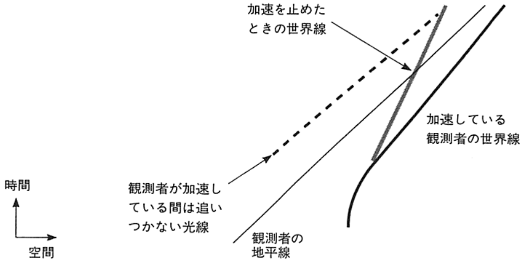


図6-2　太線は絶えず加速している観測者の世界線。観測者は光線の経路に接近するが決して横切らない。つまりこれが彼の地平線である。観測者が加速しているかぎり、その境界の向こうは何も見えないからだ。地平線の向こうにあるのは決して観測者に追いつかない光線である。加速を停止すればわれわれにはその軌跡を見ることができるし、観測者は地平線を通り、その向こう側に何があるかを見ることができる。

を隔てる。境界上にいる光子は光速で運動しているにもかかわらず、決して観測者に近づかない。もちろん、この地平線は完全に加速しているがゆえに存在する。観測者がエンジンを切り、慣性運動に入るやいなや、地平線とその向こうから来る光は追いつけるようになるだろう。

これは混乱しているように見えるかもしれない。もし観測者が光よりも速く進むことができないとすれば、観測者はどのようにしてたえず加速できるというのだ？　私が述べたことは決して相対性理論に矛盾していないからご安心を。その理由は、たえず加速している観測者は光よりも速くは進めないが、極限まで光速に近づくからである。加速度を一定とすると、一定時間内に増加する速度はしだいに小さくなる。ますます光速に近づくが決して光速にはならない。これは光速に近づくにつれて質量が増大するからである。速度が光と対等になれば質量は無限大になるだろう。しかし、無限大の質量をもつ物体を加速することはできないので、物体を光速あるいはそれ以上にまで加速はできない。それと同時に、加速している観測者の時計はわれわれの時計と比べると、速度が光速に近づくにつれて、しだいに進み方が遅くなる。このことはエンジンを吹かし、加速しているあいだ続くだろう。

ここで私が話しているのはたとえであるが、ブラックホールを考えるのに非常に役立つ。

ブラックホールの表面のすぐ上をホバーしている観測者は、星あるいはブラックホールから遠く離れた領域で、たえず加速している観測者に多くの点で似ている。どちらの場合にも、見えない領域があり、その境界線が地平線となる。地平線は観測者と同じ方向に進む光でできているが、観測者に近づくことは決してない。地平線を越えて内部に落ちるには、観測者はただエンジンを切ればいい。そうすると地平線をなしていた光が追いつき、観測者はその背後の隠れた領域に入り込む。

もちろん、二つの状況は完全に似てはいない。ブラックホールの地平線はブラックホールの客観的な性質であって、他の多くの観測者の目に見えるものなのだ。しかしながら加速している観測者にとっての見えない領域と地平線は、観測者が加速しているゆえの結果にすぎず、彼にしか見えないのである。それでも依然としてこのたとえはきわめて有用である。そのわけを理解するために、簡単な問いを立ててみよう。たえず加速している観測者があたりを見回したとき、何が見えるか？

観測者が加速しているのが、完全に空虚な領域だとしよう。近くには物質も放射も何もない――空虚な真空の空間だ。加速している観測者に、たとえば宇宙探査船に積んでいるような適当な科学機器一式、粒子検出器やら温度計やらを持たせよう。エンジン点火前には、空間がほんとうに何もない領域にいるのであるから、彼には何も見えない。エンジン

を点けてもこれは変わらないはずではないのか？

事実、そうなのだ。加速と重力が同じ効果をもたらすことは、日常生活でも経験するし、宇宙ステーションを回転させて人工重力をつくるといったSF的ファンタジーでお馴染みである。それにこれはアインシュタインの一般相対性理論のもっとも基本的な原理でもある。アインシュタインはそれを「等価原理」と呼んだ。もし窓のない部屋にいて、外部と接触がなければ、部屋が地球上にあるのか、あるいはどこか遠くの空虚な空間にあって地球に落下するのと同じ割合で加速されているのか、区別がつかない。

この加速は新しい効果を示す。それはごく簡単で、最初は重力と何の関係もないように見えた。加速前の観測者にとっては空虚な空間なのに、加速をはじめるやいなや観測者のもっている粒子検出器が粒子を検出しはじめる。言いかえると、いま旅している空間が空虚かどうかという簡単な問いに対して、加速していない友人と意見が一致しないのである。加速していない観測者には完全に空虚な空間——真空——に見える。加速している観測者には粒子で満たされた領域を通っているように見える。この効果はエンジンとは関係がない。たとえ縄で引っ張られて加速しているとしても、効果は同じだ。それは空間にまたがる加速による普遍的な結果なのだ。

もっとめざましい効果は、温度計に見られる。加速をはじめる前には、温度計はゼロを

指している。温度はランダムな運動のエネルギーの目安であり、空虚な空間にはゼロ以外の温度になる要素は何もない。さて、変化したものが加速度だけであるにもかかわらず、温度計は温度を記録する。もし測ってみれば、温度が加速度に比例するのがわかるだろう。実際、装置は突然、空虚な空間が光子やその他の粒子のガスに襲われたかのように、そのすべてが加速度に比例して温度があがるかのような数値を正確に記録するだろう。

ここで強調しなければならないが、いまここに記述していることが実際に観測されたことはない。これは一九七〇年代はじめに、カナダの若い優れた物理学者、大学院を出たばかりのビル・アンルーによって最初に予測されたものだ。量子論と相対性理論とを考えていった結果、彼はまだ観測されていないがそれでいて普遍的な、新しい効果を見いだした。それによれば加速するものは何であれ、熱い光子のガスのなかに埋め込まれているかのようになり、その温度は加速度に比例するというのである。温度 T と加速度 a の正確な関係は知られており、アンルーが導いた有名な公式で与えられる。単純なのでここで引用できる。

$$T = a(\hbar/2\pi c)$$

$\hbar$ はプランク定数、c は光の速さで、比例定数 $\hbar/2\pi c$ は通常の単位からするととても小さい。この効果が実験で確認できなかったのはそのためだ。しかし、まったく不可能と

いうわけではなく、電子を巨大なレーザーで加速して測定してみようという提案がいくつかある。量子論のない世界では、プランク定数がゼロになるので、この効果は見られない。光速が無限大になればこの効果は消えるので、ニュートン物理学でもやはり消滅する。

この効果はアインシュタインの有名な等価原理にはいわばおまけがあることを意味する。アインシュタインによれば、たえず加速している観測者は惑星の上にいる観測者に似た状況にあるはずだ。アンルーは、これが真であるのは、惑星がその加速度とつりあう温度に熱せられたときだけだ、と語った。

加速する観測者が検出した熱はどこから来たのか？　熱はエネルギーで、エネルギーは創造したり破壊したりできない。したがって、もし観測者の温度計が熱を検知したとすれば、エネルギーの源がなければならない。ではどこからなのか？　観測者の乗っているロケットのエンジンから来る。これなら理解できる。というのは、観測者が加速しているあいだだけこの効果は持続するのであるし、加速のためにはたえずエネルギーを入れる必要があるからだ。熱はただのエネルギーではない。それはランダム運動のエネルギーである。だからわれわれは加速した粒子検出器が検知した放射はどのようにランダム化されるか、と問わねばならない。これを理解するには、空虚な空間の量子論的記述の神秘に耳を傾けなければならないのだ。

量子論によれば、どの粒子もじっとしていられない。ハイゼンベルクの不確定性原理を破るからだ。静止した粒子は、決して動かないので、正確な位置をもつ。しかし、同じ理由で、その運動量はゼロと確定できる。これもまた、位置と運動量の両者を任意に正確に知ることはできないという不確定性原理を破っている。不確定性原理によれば、もし位置を絶対的な正確さで知れば、運動量の値はまったくわからないままに残さなければならないし、そして逆も成り立つ。その結果、たとえ粒子からすべてのエネルギーを取り除くことができても、何らかの固有のランダムな運動が残るだろう。この運動が「ゼロ点運動」と呼ばれるものだ。

しかしこの原理が、たとえば磁石や電流に由来する力を伝える磁場や電場のように空間に行き渡っている場にも適用できることは、それほど知られていない。この場合、位置と運動量の役割を演じるのは電場と磁場である。どこかの領域で電場の正確な値を測ると、磁場の値についてはまったくわからなくなる。これはもしある領域で電場と磁場の両方を測ったときに、両者がともにゼロであることはありえないということだ。このようにたとえ空間のある領域を零度に冷やしてエネルギーを含まないようにしても、依然、ランダムにゆらぐ電場と磁場が残る。これは真空の「量子のゆらぎ」と呼ばれている。この量子のゆらぎは据えつけられてじっとしている普通の装置では検出できない。なぜならそれらは

エネルギーをもっていないし、エネルギーだけが検出器におけるエネルギーの存在を記録できるからである。しかし、すごいのは、加速された検出器ならそれが検出できるということだ。検出器の加速がエネルギー源を提供するのである。加速した観測者が携えている温度計の温度を高めているのが、まさしくこれらのランダムな量子のゆらぎなのである。

ランダムさがどこから来るかは、これでもまだ完全に説明がついていない。それは量子論のもう一つの中心概念と関係があることが判明している。量子システムのあいだの非局所的な相関関係である。これらの相関関係はアインシュタイン－ポドルスキー－ローゼン実験のような特別の場合に観測できる。この実験では、いっしょに生まれた二つの光子が、別々に光速で旅をする。しかし測ってみると、それらの性質は一方の完全な記述が他方の記述を含むような仕方で、相関していることがわかる。二つの光子がどれだけ遠く離れて旅していてもそうなのだ（図6－3）。真空の電場と磁場をつくり上げている光子はまさしくこの仕方で相関する対をなして現れる。さらに、加速する観測者の温度計が検出する各々の光子は、地平線の向こうの光子と相関する。つまり観測者が検出した各々の光子を完全に記述したいと思っても、そのために必要な部分の情報は隠れた領域にある光子がもっており、アクセスできないということだ。その結果、彼の観測したものは本来的にランダムである。気体のなかの原子の場合と同じく、観測している光子がどのように動いてい

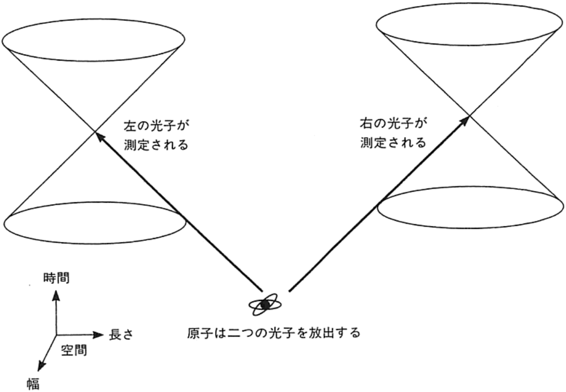


図6-3　アインシュタイン―ポドルスキー―ローゼン（EPR）実験。二つの光子は原子の崩壊で生まれる。それらは反対方向に旅して、その後でたがいの光円錐の外部にある二つのできごとで測定される。これは右側の光円錐にいる観測者が測定しようと選んだ左側のできごとに向かって、情報が流れないことを意味する。それにもかかわらず、左側の観測者が見るものと、右側の観測者が測ろうと選んだものとのあいだには相関がある。これらの相関関係は情報を光より速く伝えない。なぜならそれらは両側の測定の統計が比較されたときにだけ検出できるからである。

るかを、正確に予測する方法はない。その運動がランダムだとしかいえない。しかし、ランダムな運動は定義によって熱である。だから、彼の見ている光子は熱いのだ！

この物語をもう少したどってみよう。物理学者は、任意の熱いシステムにどれだけのランダムさが存在するかについて一つの尺度をもっている。それはエントロピーと呼ばれ、任意の熱いシステムにおける原子の運動にどれだけの無秩序あるいはランダムさがあるかを正確に示す尺度である。この尺度は光子にもやはり適用できる。たとえば、テレビのテストパターンから来る光子はランダムなので、「Xファイル」を運ぶ光子よりもエントロピーが高い、ということができる。加速している検出器が検出する光子はランダムであり、したがって有限な量のエントロピーをもつだろう。

エントロピーは情報の概念と密接に関連している。物理学者とエンジニアは任意の信号あるいはパターンにどれだけの情報が利用できるかを示す尺度をもっている。ある信号が運んでいる情報は、その信号で符号化できるイエス／ノーで答えられる質問の数に等しいと定義される。デジタル世界では、大部分の信号はビットの系列として伝達される。これらは1と0の系列であるが、イエスとノーの系列と考えてもいい。個々のビットはイエス／ノー質問の答えとして符号化できるので、信号の情報内容はこのビットの数に等しい。メガバイトはまさしくこの意味での情報の尺度であり、たとえば一〇〇メガバイトのメモ

リをもつコンピュータは、一億バイトの情報を蓄えられる。一バイトは八ビットであり、一ビットはイエス／ノー質問一つの答えに対応するので、一〇〇メガバイトのメモリには八億個のイエス／ノー質問の答えが蓄えられるということだ。

加速している観測者が見る熱い光子の正確な状態に関する情報は欠けている。それは隠れた領域にある光子の状態のなかに符号化されているからだ。ランダムさは隠れた領域の存在の結果であるので、エントロピーは加速する観測者に見ることのできない世界がどのくらいあるかについて、何らかの目安を取り込まなくてはならない。それはその隠れた領域の大きさと多少関連するはずだ。これはおおよそ正しい。実際には隠れた領域と観測者を隔てる境界線の大きさの目安である。加速の結果、観測される熱い放射のエントロピーは、地平線の面積にぴったり比例することがわかっている。この地平線の面積とエントロピーの関係を発見したのは、アンルーが偉大な発見をなしたのとほぼ同じころ、プリンストンで研究していたジェイコブ・ベッケンスタインという名前の大学院生だった。二人はどちらも、その数年前にブラックホールという名前を考え出したジョン・ウィーラーの学生だった。ベッケンスタインとアンルーはウィーラーの薫陶を受けた学生の長いリストに連なる。リチャード・ファインマンもその一人だ。

この二人の若い物理学者は二つの一般的で単純な法則をもたらし、量子重力論の研究か

ら生まれる最初の物理的予測となるものだった。それらはこう述べる。

●アンルーの法則　加速している観測者は、その加速度に比例する温度の、熱い光子の気体のなかに埋め込まれているのを見る。

●ベッケンスタインの法則　観測者を隠れた領域から分離する境界線を形づくるどの地平線にも、隠された情報の量を測るエントロピーが結びついている。このエントロピー量はつねに地平線の面積に比例する。

これら二つの法則は、つぎの章で見るように、量子ブラックホールを理解するための基礎なのである。

7　ブラックホールは熱い

ここまで、加速している観測者を考えてきたのは、その状況がブラックホールの地平線のすぐ上をホバーしている観測者のそれに似ているためである。そこで前章の最後に見いだした二つの法則を適用して、ブラックホールの上をホバーしているときにわれわれに何が見えるか考えてみよう。ブラックホールの外部の観測者が熱い光子気体に埋められているであろうと、類推できる。その温度は、宇宙船を地平線上から一定の距離でホバーさせておくのに必要な加速度と関連しているはずである。その上、この観測者が検出する光子

はランダム化している。なぜなら、それを完全に記述するには、地平線の向こうの情報、観測者が見ている光子と地平線の向こう側にとどまっている光子のあいだの相関で符号化された情報が必要となるだろうからである（図7‐1）。この失われた情報を測るには、まずエントロピーがブラックホール由来のものと考えねばならない。すると今度は、このエントロピーが実は、ブラックホールの地平線の面積に比例すると判明するのである。

加速する観測者が測る温度とエントロピーは、観測者の運動だけ考えれば導ける。もしエンジンを切れば、地平線を形づくっていた光子は宇宙船に追いつくだろう。こうして観測者は隠れた領域を覗き込むことができる。もはや熱い光子気体を見ることはなく、温度も検出されない。空虚な空間しか見えず、見失われた情報はない。隠された領域がなく、したがって地平線がないという事実と矛盾しない。しかし、ブラックホールには無数の観測者が考えられるのだ。彼らはその先を見ることのできない地平線があるという点で一致する。地平線を貫いて落下しなかったすべての観測者は、そこにブラックホールとその地平線があることに同意するからである。このことは、ブラックホールから遠く離れたすべての観測者は、それが温度とエントロピーをもつことに同意するだろうことを意味する。

回転せず電荷をもたない単純なブラックホールについては、温度とエントロピーの値を非常に単純に表現できる。単純なブラックホールの地平線の面積は、プランク単位で質量

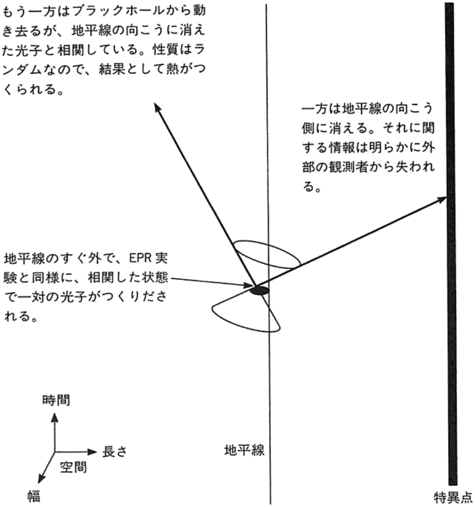


図7-1　スティーヴン・ホーキングが発見したブラックホールからの放射。ブラックホールから遠ざかる光子はランダムな性質と運動をもつ。なぜなら、それは図6-3の光子の一つのように、地平線の背後に失われた光子と相関しているからである。地平線の外部の観測者は落下する光子が携えた情報を回復できないので、外向きに運動する光子は熱い気体の分子のように、熱運動をしているように見える。ブラックホールを離れる放射はゼロでない温度をもつというのが結果である。それはまたエントロピーをもっているが、これは失われた情報の目安である。

の二乗に比例し、エントロピーSはこの量に比例する。プランク単位を用いれば、簡単な公式、

$$S = {}^{1}\!/_{4}A/\hbar G$$

が得られる。ここでAは地平線の面積、Gは重力定数である。

この方程式にはゲラルト・トフーフトによる非常に単純な解釈がある。トフーフトは、量子重力論の問題に注意を向ける前に、素粒子物理学で重要な業績を残し、一九九九年にノーベル物理学賞を受けた人物だ。彼はブラックホールの地平線は、四プランク面積につき一つの画素がある、コンピュータのスクリーンのようなものであると唱えている。各々の画素はオンにしたりオフにしたりできる、つまり一ビットの情報を符号化できることを意味する。ブラックホールの内部に含まれている情報の総ビット数は、地平線を覆うのに要するこのような画素の総数に等しい。プランク単位は非常に小さい。たった一平方センチメートルに10^{66}プランク面積の画素が必要である。となると地平線が直径数百キロメートルの天体物理学的ブラックホールは、途方もない量の情報を含むことができるのである。

もしあるシステムにエントロピーがあれば、エントロピーの作用はつねに時間的に不可逆である。これは、エントロピーが創造できるだけで破壊できないと述べる、熱力学の第二法則のせいである。もしティーポットを床に落として割れば、大いにそのエントロピー

を増やしたことになる——それをいっしょにしてつなぎ合わせるのは途方もなくむずかしい。熱力学では、ある過程の不可逆性はエントロピーの増大によって測られる。なぜならそれはランダム運動として失われた情報の量を測るからである。だが、いったん失われた情報は決して回復できないので、エントロピーは通常、減少しない。これは熱力学の第二法則を表現する一つの方法である。

ブラックホールの作用もまた時間的に不可逆である。事物はブラックホールのなかに落ち込めるが、何もそこから出てこられないからである。これにはスティーヴン・ホーキングが発見した一つの結論がある。それはブラックホールの地平線の面積に関するものだ。彼はブラックホールの地平線が時間とともに減少することはありえないと、非常にエレガントに証明した。時間とともに増加するのみであるという点で、ブラックホールの地平線の面積とエントロピーとが類似していると考えるのは当然だ。ベッケンスタインのすばらしい洞察は、これがたんなる類推ではないことを示したことにあった。

温度はランダム運動のエネルギーの目安であり、もし箱のなかに何もなければ、ランダムであろうとなかろうと、いかなる運動もありえない。だが、システムは通常、熱なしにはエントロピーはもちえない。これは失われた情報がランダム運動となり、ランダム運動があれば熱があるということだからだ。だから、もしブラックホールがエントロピーをも

てば、熱力学の法則は破られることになる。

このミステリーを最初に解いたのはホーキングで、彼はもしブラックホールが熱ければ、熱力学の法則とのあいだには矛盾はないことに気づいた。大雑把ではあるが、こうして推論の連鎖をたどって、彼はブラックホールの外側にいる観測者には、ブラックホールが有限の温度をもつものとして見えることを示すことができた。プランク単位で表現すれば、ブラックホールの温度Tはその質量mに反比例する。これが三番目の法則、ホーキングの法則である。

$$T = k/m$$

定数kは通常の単位では非常に小さい。その結果、天体物理学的規模のブラックホールの温度は一度の何分の一にも満たない。したがって、マイクロ波背景放射の二・七度よりもずっと小さい。しかし、たとえ寸法はもっと小さくとも、もっと質量の小さいブラックホールは、それに応じて温度が高い。エヴェレスト山と同じ質量のブラックホールは一個の原子核よりも大きくないが、星の中心よりも高い温度で輝くだろう。

ブラックホールが放つこの放射は「ホーキング放射」と呼ばれ、エネルギーを運び去る。アインシュタインの質量とエネルギーの有名な関係$E=mc^2$によれば、放射は質量も同じように運び去る。ブラックホールが質量を放射し去る過程は「ブラックホール蒸発」と

呼ばれる。ブラックホールが蒸発するにつれて質量は減少する。だが、温度は質量に反比例するので、質量を失うにつれて熱くなる。温度が高くなって、最後には個々の光子がほぼプランク・エネルギーを放出するようになる。この時点でブラックホールの質量はそれ自身ほぼプランク質量に等しくなり、その地平線は差しわたし数プランク長さになる。量子重力が勢力を振るっている領域に降りたのだ。つぎにブラックホールに起こることは、完全な量子重力論でしか決定できないだろう。

天体物理学的なブラックホールの蒸発は非常にゆっくりした過程である。蒸発速度は温度に依存するが、最初は温度自体が低いので非常に遅い。太陽ほどの質量のブラックホールが蒸発するのに、宇宙の現在の年齢の約10^{57}倍もかかる。だからこれは直接観測しようとしてできることではない。しかし、ブラックホール蒸発の最後に何が起こるかという疑問は、量子重力について考えているわれわれを魅了する問題である。たとえば、ブラックホールの内部に捕らえられている情報はどうなるか？　捕らえられた情報の量はブラックホールの地平線の面積に比例すると述べた。ブラックホールが蒸発すると、地平線の面積は減少する。これは捕らえられた情報の量も同じように減少することを意味するのか？　もし情報も減少しなければ、矛盾してしまうだろう。だがもし減少するのであれば、どのようにして情報が出てくるのかを説明しなければならない。それは地平線の向こうに捕らわ

れている光子に符号化されているからだ。

同じように、地平線の面積が縮小するにつれて、ブラックホールのエントロピーは減少するか否か、と問うこともできる。二つの量は関係しているので、当然そうなるはずと思える。しかしこれはエントロピーは決して減少しないという、熱力学の第二法則をたしかに破る。一つの答えは、必ずしもそうならないというものだ。なぜなら、ブラックホールの放出する放射は多量のエントロピーをもっており、それがブラックホールの損失を償っているからだ。熱力学の第二法則はただ世界の総エントロピー量が決して減少しないことだけを要求している。もしこの総量にブラックホールのエントロピーを含めるなら、すべての証拠は熱力学の第二法則が依然成り立つことを示す。何かがブラックホールのなかに落ち込むとき、外部の世界はいくぶんエントロピーを失うだろうが、ブラックホールのエントロピーの増大はそれを償って余りある。他方、もしブラックホールが面積ひいてはエントロピーを失うように放射すれば、外界のエントロピーは増大してそれを埋め合わせるだろう。

これらすべての結果は、たいへん満足すべきであると同時に大いに頭を悩ませる。それが満足なのは、ブラックホールの研究から熱力学の法則の美しい拡張が引き出されたことだ。最初は、ブラックホールが熱力学の法則を破るように見えた。だが、最後には、もし

ブラックホールそのものがエントロピーと温度をもてば、熱力学の法則は依然正しいことを理解したのである。頭を悩ませるのは、多くの状況では、エントロピーは失われた情報の目安であることだ。古典的な一般相対性理論では、ブラックホールは、質量と電荷などいくつかの数で記述できる。しかし、もしエントロピーがあるのなら、何か失われた情報があるはずである。ベッケンスタイン、ホーキングとアンルーの計算にしても、それがどのようなものかについてヒントを与えてくれない。

しかし、もし古典理論に失われた情報の本性について手掛かりがなければ、残っているのはただ一つの可能性である。それを知るにはブラックホールの量子論が必要だ。もしブラックホールを純粋な量子システムとして理解できれば、エントロピーは量子レベルではじめて明らかになる。だから、量子重力論を手にしたときにだけ答えられるような質問を出そう。ブラックホールに捕らえられた情報はどのような性格のものか？　先に進むあいだもこれを念頭に置き、量子重力へのさまざまなアプローチを探究していこう。いかに上手くこの質問に答えるかが量子重力論の試金石となるはずだ。

8　面積と情報

二十世紀のはじめには少数の科学者しか原子を信じていなかった。いまでは、教育ある人びとで原子を信じないのはよほど珍しい。だが、空間についてはどうか？　もし空間を少し、たとえば一立方センチメートル取って、各辺をそれぞれ二等分すれば、八つの小さな空間の断片をつくることができる。さらにその各辺を二等分し……と、つづけていくことができる。物質ではどこまで小さく分割できるかには限界がある。空間についてもこれは真実だろうか？　われわれはどこまでも進んで、空間をより小さな、より小さな小片へ

と、際限なく細分していけるのだろうか？　私がプロローグで描いた三つの道はこの質問に対して同じ答えだ。つまり、たしかに空間には最小の単位があるのだ。物質の滑らかな見かけが幻想であるように、空間の連続的な見かけもまた幻想だと信じるに足る理由があるのだ。十分小さな尺度で見れば、空間が数え切れる事物でできているのがわかる。

おそらく空間を離散的なもの、すなわちとびとびのものとして思い描くのはむずかしい。結局のところ、なぜあるものを空間の最小単位の半分の体積に納まるようにできないのか？　これは考え方が間違っている、というのが答えだ。そういう問いを立てることは、空間が絶対的に存在し、事物はそこに入れることができるものと想定することなのだ。だが、空間が離散的だというときに、われわれが意味していることを理解するには、完全に関係だけをもとにしたものの見方になじみ、周りの世界を発展する関係のネットワーク以外の何ものでもないと見、そして感じるよう努めなければならない。これらの関係は空間に配置されている事物のなかには数えない――それらは世界の歴史をつくり上げているできごとなのだ。関係は単刀直入に空間を定義している。

この関係的な観点から見れば、世界が離散的であるという言い方も意味をなす。実際、有限個数のできごとだけを考えれば済むのだから、この方がずっと簡単だ。関係のネットワークで構成された滑らかな空間を思い描く方がずっとむずかしい。どんな狭い空間であ

っても、任意の体積の空間のなかのできごとのあいだに、無限の関係がなくてはならなくなるからだ。たとえその他の証拠がなくても（あるのだが）、時空が関係しあっているという見方を考えることがこれほど容易だという事実は、空間と時間の両方を離散的だと想像するのに十分な理由となろう。

もちろん、これまでだれも空間の原子を観測したものはいない。また、理論から導かれた予測のうち、空間は離散的であるという予測が実験的に検証されたこともない。だが現在の状況は、ある意味で、物理学者が原子の存在を信じるようになった、十九世紀の最後の一〇年間から二十世紀最初の一〇年間にまたがる二〇年間の期間に似ている。原子の存在を検出したと言える最初の実験が、原始的な素粒子加速器を用いてなされた一九一一―一二年の時期には、物理学者はすでに原子の存在を確信していたのだ。

人びとに原子の存在を納得させた決定的な議論は、熱、温度とエントロピーを支配する法則の理解に関係がある――熱力学と呼ばれる物理学の分野だ。熱力学の法則のなかには、すでに論じた第二法則、「エントロピーは決して減少しない」がある。またいわゆる第零法則は、あるシステムのエントロピーが極限まで高くなると、システム全体の温度が一様になると述べる。これらの他に「エネルギー保存則」といわれる第一法則があり、エネルギーは創造も破壊もできないとする。

十九世紀の大部分を通じて、大方の物理学者は原子を信じていなかった。たしかに化学者たちは、異なる物質が一定の比率で結合することを発見し、これは原子の存在を強く示唆するものだったが、物理学者はあまり感銘を受けなかった。一九〇五年まで大部分の科学者は、物質が連続的か、あるいは原子が存在するかという問題は科学の領域外にある、と考えていた。たとえ原子が存在するとしても、永久に観測不可能だからだ。科学者たちは原子あるいはその運動に言及しない形で、熱力学の法則を展開した。彼らは、私がこの章のはじめに導入した温度とエントロピーの基本的定義を信用しなかった。温度はランダム運動のエネルギーの目安であり、エントロピーは情報の目安であるという定義である。彼らはその代わりに、温度とエントロピーを物質の本質的性質と理解した。物質はたんなる連続的な流体で、温度とエントロピーはその基本的な性質の一部である、というのである。

第二法則にしたがえば、宇宙のエントロピーは増大する一方なので、未来は過去とは異なる。一方では、これらの人びとはもし原子があれば、それらはニュートンの法則にしたがうだろうと推論した。しかし、ニュートンの法則は時間については可逆的である。ニュートンの法則にしたがって相互作用する一組の粒子を映画に撮って、物理学者たちにこの映画を二回上映して見せるとしよう。一回は撮影したとおりの順序で、二回目は逆向きに。

画面に映っているのが少数個の粒子だけなら、どちらが時間の流れる正しい方向で上映されているか決定することは物理学者にもできない。

大きな巨視的な物体では事態は大いに異なる。われわれが住む世界では、未来は過去とは非常に異なっており、これはまさにエントロピーが未来に向かって増大するという法則通りだ。これがニュートンの理論では未来と過去は可換、すなわち入れ換え可能であるという事実と矛盾するように見えることから、二十世紀の最初の数十年間、その存在に対する決定的な実験証明が得られても、多数の物理学者は物質が原子でつくられていることを信じようとはしなかった。

温度はランダム運動のエネルギーの目安であり、エントロピーは情報の目安である。この考え方は熱力学の統計的定式化と呼ばれるものの根底にある。この見方によれば、通常の物質は膨大な数の原子からなる。よって通常の物質のふるまいについて統計的に推論しなければならないことになる。「統計力学」の基礎にしたがえば（この見方はそう呼ばれている）、ニュートンの法則から熱力学の法則を導き出すことで生じる、時間の方向に関する見かけ上のパラドックスを説明できる。熱力学の法則は絶対的でないことを理解することでパラドックスを解消できるのだ。それらはもっとも起こる確率が高いことを記述しているが、法則が破れる確率も小さいながらつねにあるのだ。

ここでの議論はかなり微妙で、大方の物理学者が確信をもつには何十年もかかった。エントロピーが情報と確率に関係があるという説を唱えたルートヴィッヒ・ボルツマンは、一九〇六年、大部分の物理学者が彼の説を受け入れる前に自殺してしまった。(同僚たちが彼の説を受け入れなかったことが彼の鬱病と関係があったかどうかはともかく、少なくとも彼の自殺は広範囲にわたって影響を与えた。彼の死によってルートヴィッヒ・ウィトゲンシュタインという名の若い物理学の学生が物理学を諦め、イギリスに渡って工学と哲学を学ぶことに決めたのだ。)実際、大方の物理学者が原子の存在を最終的に確信したのは、その前年に特許局勤務の若い事務員アルバート・アインシュタインが発表した議論だった(私の物理の教師が口癖のように「あのアインシュタインが」と言っていたのを思い出す)。この議論は、統計的観点からすると熱力学の法則がときどき破れることもあるという事実と関係する。ボルツマンが発見したのは、熱力学の法則が厳密に正しいのは無限個の原子を含むシステムであるということだった。有限個の分子、原子を含むシステムでは、熱力学の法則はときどき破れることをアインシュタインは理解していた。グラスのなかの水分子の数は大きいので、この効果は小さいが、それでも状況によっては観測されることがある。この事実をもとに、アインシュタインは観測できる分子運動の出現を発見することができた。顕微鏡で眺めると花粉中の粒子がランダムに動き回るのが見えた。原子

の衝突によって突き動かされ、揺れ動くのである。

これらの議論が成功したことで、アインシュタインやその他の人たち、たとえば彼の友人ポール・エーレンフェストは同じ推論を光にも当てはめてみた。ジェームズ・クラーク・マクスウェルが一八六五年に発表した研究によれば、光は電磁場を伝わる波からなっており、それぞれの波は一定量のエネルギーを運んでいる。アインシュタインとエーレンフェストは、ボルツマンのアイデアを使ってオーヴンの内部の光の性質を記述できるかどうかと考えた。

オーヴンの壁の原子が熱せられ揺れ動くとき光を放つ。こうして生まれた光は熱いと言えるだろうか？　光にはエントロピーと温度はあるだろうか？　彼らが見いだしたことはその当時のだれにも頭の痛いものだった。彼らは、光もある意味では原子というよりも量子からなっていると考えなければ、凄まじい矛盾に陥るだろうことを見いだした。個々の光の量子を彼らは「光子」と名付け、光の振動数に関係するエネルギーの単位を運んでいるとした。これが量子論の誕生だった。

もうこれ以上、量子論については語らない。それはあまりにもねじれた物語だからだ。アインシュタインとエーレンフェストが推論に採用した結果のいくつかは、彼らより五年早くマックス・プランクが熱い放射の問題を研究した際に見いだしたものだった。有名な

「プランク定数」がはじめて現れたのはここである。だが、プランクは原子もボルツマンの業績も信じない物理学者の一人だったので、彼の自分の研究結果に対する理解は混乱しており、部分的には矛盾していた。したがって量子物理学の誕生はアインシュタインとエーレンフェストの功績とするほうがよいだろう。

この物語の教訓は、熱力学の法則をなんとか解明しようという試みこそが、原子物理学の理解を深める二つの決定的なステップを導いたということだ。その試みが原子の存在を物理学者たちに確信させることになり、光子の存在をはじめて明らかにした。この二つのステップを同じ若者アインシュタインが同じ年に歩みはじめたのは決して偶然ではない。

さてようやく量子重力、特に量子ブラックホールの話に戻ることができる。ブラックホールの温度というのは実際には何を測っているのか？　ブラックホールのエントロピーというのはほんとうは何を記述しているのか？　そしてもっとも重要なのは、なぜブラックホールのエントロピーはその地平線の面積に比例するのか？

物質の温度とエントロピーの意味の探究は原子の発見につながった。放射の温度とエントロピーの意味の探究は量子の発見につながった。ちょうど同じように、ブラックホールの温度とエントロピーの意味の探究はいまや、空間と時間の原子構造の発見につながろうとしている。

原子および光子の気体と相互作用しているブラックホールを考えよう。ブラックホールは原子あるいは光子を飲み込むことができる。そうすると、ブラックホールの外部の領域のエントロピーが減少する。なぜならエントロピーはその領域に関する情報の尺度であって、もし原子あるいは光子が少なければ気体についてわかることもそれだけ少ないからである。その減少を補うために、ブラックホールのエントロピーは増大しなければならない。さもなければエントロピーは決して減少しないという法則は破られてしまうからだ。ブラックホールのエントロピーが地平線の面積に比例するので、結果として地平線が少し膨張しなければならない。

別の過程をたどることもできる。地平線が少し縮小する、つまりブラックホールのエントロピーが減少する。これを補うために、ブラックホールの外部ではエントロピーが増大するはずだ。そうなるためには、光子がブラックホールのすぐ外側で創り出されねばならない——ホーキングが予測した、放射を構成する光子が、ブラックホールから放出されるはずだ。光子は熱く、地平線が縮むという事実を補うために必要なエントロピーを運んでいる。

ここで起こっているのは、エントロピーが減少しないという法則を保持するために、ブラックホールの外部の原子と光子のエントロピーと、ブラックホールそのもののエントロ

ピーとのあいだで、釣り合いを十分検討することである。しかし、二つの非常に異なる事物が比較されていることに注意しなければならない。ブラックホールの外部のエントロピーは、物質は原子でできているということを前提とし、失われた情報と関係する。ブラックホールそのもののエントロピーは、原子とも情報とも関係なさそうに見える。それは空間と時間の幾何学と関係する量の尺度であり、ブラックホールの事象地平線の面積に比例する。

非常に異質なもの二つの釣り合い、あるいは交換を主張する法則は、どこか不完全だ。まるであたかも二通りの通貨があり、一方は金のような具体的な対象と交換可能であり、もう一方は紙で表す以外に価値がないようなものだ。仮に、この二種類のお金を銀行口座で自由に混ぜてもよいとしよう。このような経済は矛盾の上に立っており、長くはつづかないだろう。（事実、共産主義政府は二種類のお金、一方は他の通貨と交換可能でもう一方は可能でないものを用いて実験し、二つの種類のお金の使用に関するあらゆる種類の複雑で人工的な制約なしでは、システムは不安定であることを発見した。）同じように、情報を幾何学に転換させてもよく、その逆も可能で、その根拠が説明できないような物理法則は長続きしないはずだ。何かもっと深い、もっと簡単なものが等価性の根底にあるはずなのだ。

ここから二つの深遠な疑問が起こる。

●ブラックホールのエントロピーは、物質のエントロピーとまったく同じように、つまり原子の運動に関する情報の尺度として理解できるような原子構造が、空間と時間の幾何学にもあるだろうか？

●その原子構造がわかったあかつきには、なぜブラックホールの地平線の面積がその向こうに隠された情報の量に比例するのかが明白になるだろうか？

ループ量子重力論とひも理論、両者とも空間に原子構造があると主張する。つぎの二つの章では、ループ量子重力論が実際にかなり詳細な原子構造の描像を与えていることを示す。ひも理論から得られる原子構造の描像は現在のところまだ不完全だが、第11章で見るとおり、空間と時間が原子構造でなければならないという結論を避けることは、ひも理論では不可能なのだ。第13章では、空間の原子構造の描像をどちらの理論から導いてもブラックホールのエントロピーと温度の説明に利用できることがわかるだろう。

しかし、たとえこうした詳細な描像がなくても、前のいくつかの章で学んだことにもとづいた非常に一般的な議論があって、そこからも空間は原子構造をもたねばならないとい

う結論にたどりつく。その論法は地平線がエントロピーをもつという簡単な事実にもとづいている。ここまでの章でこれが、ブラックホールの地平線と、加速している観測者が経験する地平線の両者に共通だということを見てきた。いずれの場合にも、外部の観測者の到達できない隠れた領域があって、情報が捕らえられている。エントロピーは失われた情報の尺度なので、これらの場合には地平線と結びついたエントロピーがあって、隠れた領域の境界線をなしていると考えるのが合理的であろう。しかしもっともめざましいのは、エントロピーで測られる失われた情報の量が非常に簡単な形をしていることだ。プランク単位での地平線の面積の四分の一に等しいのである。

失われた情報が捕らえられた領域の境界の面積に依存しているという事実は、非常に重要な手掛かりである。もしこの依存していることと、時空が情報によって構造づけられるものとして理解できるという事実とがいっしょになれば、さらに意義深くなる。この情報は第4章で見たように過去から未来へと伝達されるのである。もし曲面を、空間のある領域から別の領域に情報が流れ込む一種のチャンネルと見なせば、曲面の面積は情報を伝える能力の尺度となる。これはたいへん示唆に富んでいる。

捕らえられた情報の量が境界の面積に比例することもまた奇妙である。ある領域に捕らえることのできる情報の量が、境界の面積に比例するのではなく体積に比例する方がより

自然に思える。境界の向こう側に広がる隠された領域に何が捕らえられているとしても、それは境界の単位面積当たり有限個のイエス／ノー問題の答えしか含めない。これは地平線が有限の面積をもつブラックホールは有限の量の情報しかもちえない、と言っているように思える。

もしこれが前章で私が述べた結果の正しい解釈であれば、世界は離散的でなければならないと告げれば十分であろう。与えられた空間の体積が地平線の背後にあるか否かは観測者の運動に依存する。どんな空間の体積を考えるにしても、その領域が観測者の隠れた領域の一部になるように、加速して離れ去る観測者を見いだすことができる。ここからその体積には、われわれが論じている限界以上の情報はありえない、つまり境界の単位面積当たり有限の量の情報しかないとわかる。もしこれが正しければ、どの領域も有限の量以上の情報を含めない。もし世界がほんとうに連続的であれば、空間のどの体積も無限の量の情報を含めるだろう。連続的な世界では、一つの電子の位置を指定するのにさえ、無限の量の情報が要る。これは位置が実数で与えられ、大部分の実数は記述するのに無限個の数字を必要とするためである。もしその十進法展開を書き出せば、その数を書き出すのに無限個の小数点以下の場所がいるだろう。

実際、地平線の背後に蓄えられている情報の最大量は莫大である――一平方センチメー

トル当たり10^{66}ビットの情報だ。実際の実験はこの限界を探るのにはまだまだ手が届かない。しかし、もしプランク尺度で自然を記述しようとすれば、われわれはたしかにこの限界にぶつかる。四プランク面積当たり一ビットの情報しかないからだ。結局のところ、もしこの限界が一平方プランク面積当たりではなく一平方センチメートル当たり一ビットであったならば、何を見るのも至極むずかしいだろう。われわれの目はせいぜい一時に一個の光子にしか応答できないからだ。

二十世紀物理学の重要な原理の多くは、知りうることの限界として表される。(ガリレオの原理の拡張である)アインシュタインの相対性原理は、静止しているものと等速度で運動しているものとを実験で区別することはできないとする。ハイゼンベルクの不確定性原理は、粒子の位置と運動量を、同時に任意の精度で測ることはできないとする。この新しい限界からすると、地平線の反対側に含まれているものに関して、われわれの知りうる情報には絶対的な限界があることになる。これはベッケンスタインが一九七〇年代にブラックホールのエントロピーを発見した直後に書いた論文のなかで論じられているので、ベッケンスタイン限界と呼ばれている。

量子重力論を研究した者ならだれでもこの結論に気づいていたにもかかわらず、少数の研究者以外はベッケンスタインの論文の発表後二〇年近くなるまで、これを真剣に受け止

めなかったのは不思議である。彼の用いた議論は単純だったが、ジェイコブ・ベッケンスタインは彼の時代にはるかに先んじていたのだった。

9　いかに空間を数えるか

空間と時空の原子構造のくわしい記述をもたらした最初の試みは「ループ量子重力論」だった。この理論は描像以上のものを提供する。プランク尺度ほどの短い距離で空間の幾何学を探索できさえすれば、何が観測できるかについて精密な予測をおこなうことも可能になる。

ループ量子重力論によれば、空間は離散的な原子からできており、それぞれの原子は非常に小さい体積の単位を運ぶ。通常の幾何学と対照的なのは、与えられた領域は勝手な小

ささ、あるいは大きさの体積をもつことはできないことだ——その代わりに、体積は有限な数の集合の一つでなければならない。これが量子論が他の量にもおこなっていることなのだ。ニュートン物理学によれば、量は連続的なものだが、ここでは有限な値の集合に制限される。これが原子のなかの電子のエネルギーと電荷の値にも起きていることである。

このことから導かれる結論の一つは最小の可能な体積というものが存在するということである。この最小限の体積はごく小さい——指輪に約10^{99}個もおさまるだろう。もしこの最小限体積の領域を半分にしても、半分の体積をもつ二つの領域にはならない。それどころか、この過程によって二つの新しい領域がつくりだされ、二つを合わせるとはじめよりも体積が大きくなる。われわれはつぎのような言い方でこれを記述することができる。最小限の大きさよりも小さい体積の単位を測ろうとすると、より大きな体積をつくりだしてしまう、と。

ループ量子重力論で量子化される量は体積だけではない。どんな空間の領域も境界、つまり曲面に囲まれているが、この曲面には面積があり平方センチメートルで測られる。古典幾何学では曲面はどんな面積もとりうる。これとは対照的に、ループ量子重力論は可能な最小の面積があると予測している。体積の場合と同じく、理論はある曲面がもちうる最小の面積をある有限な値の集まりに限定している。どちらの場合にも、可能な値のあいだ

の飛躍は非常に小さく、プランク長さの平方および立方程度である。空間は連続的であるという幻想を抱くのはこのためである。

量子重力論の物語がほんとうにはじまったのは、一九五〇年代、まったく別のテーマと思われていた超伝導の物理学から生まれたアイデアだ。物理学とはこうしたものだ。少数のほんとうにいいアイデアはある分野から別の分野へと伝わるものなのだ。金属や超伝導体のような材料の物理学は、物理システムのふるまい方についてのヒントをもたらす非常に豊かな源泉なのである。疑いもなくこれらの分野には、理論と実験の密接な相互作用があり、物理システムが自分自身を組織する新しい方法を発見することが可能である。だが、素粒子物理学にはそれがモデル化しているシステムを直接さぐる手段がないので、幾度となく材料物理学に新しいアイデアを求めたのである。

超伝導とはある種の金属の電気抵抗がゼロになる、特異な状態を言う。金属を臨界温度と呼ばれる温度以下に冷やすことで超伝導体に変えることができる。臨界温度は通常非常に低く、絶対温度にして数度しかない。この温度では金属は水が凍るのに似た相の変化を起こす。もちろん、それはすでに固体であるが、内部構造に何か深刻な変化が起こって電子が原子から解放され、抵抗なしに内部を動き回れるようになる。一九九〇年代以来、室温で超伝導性を示す物質が精力的に探された。もしこのような物質が見つかれば、電気供

給の経費が大幅に軽減するので、莫大な経済効果があがるだろう。しかし私が論じたいと思っているアイデアは、超伝導体の働きがいかに簡単であるかが理解されはじめた一九五〇年代にまで遡る。重要なステップはジョン・バーディン、レオン・クーパーとジョン・シュライファーらによる理論、超伝導のＢＣＳ理論と呼ばれるものが打ち立てられたことであった。彼らの発見が重要であったのは、材料理論のその後の発展に影響しただけではなく、素粒子物理学と量子重力論の発展に寄与したことにある。

子供のころ学校で、磁石、紙片それに若干の鉄粉を使って簡単な実験をしたのを覚えているだろう。磁石の周りの紙に繰り広げられた磁力線に鉄粉をふりかけることで磁場を目に見えるようにするというのが、その実験のねらいである。一方の極から他方の極にのびる一連の曲線が見られる（図９－１）。そのときに教師から聞かされたと思うが、見かけ上、磁力線が離散的であるのは幻想である。自然では、力線は連続的に分布している。鉄粉に大きさがあるために磁力線が離れればなれに見えるにすぎない。しかしながら、ある状況では磁力線はほんとうに離散的である。もし超伝導体に磁場を通せば、磁場は離散的な磁力線に分裂し、それぞれが磁束と呼ばれる量の基本的な単位を担う（図９－２）。実験は超伝導体を通過する磁束の分量がつねにこの基本的単位の整数倍であることを示している。

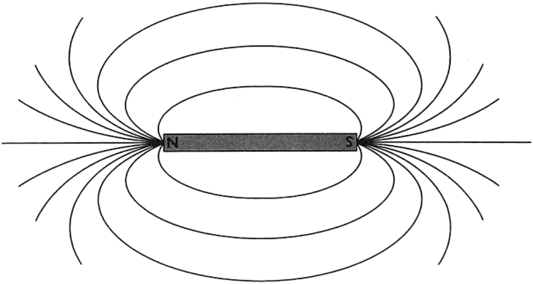


図9-1　普通の磁石の二つの極のあいだの力線（空気中）。

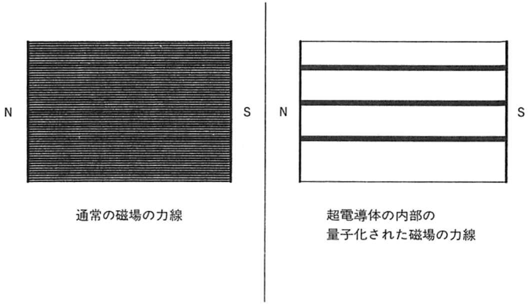


図9-2　超伝導体の磁場は離散的な磁束に分裂するが、その各々がある最低限の場の量を担う。

超伝導体におけるこの磁力線の離散性は奇妙な現象である。その離散性は力を担っている場とかかわっている点で、電荷あるいは物質の離散性と異なる。その上、磁場が通過している材料如何によって、オンあるいはオフにできるように見える。

電場にも同じく電気力線が見られるが、鉄粉の実験と同じような離散性は見られない。われわれの知るのはすべて、場が連続的であるような状況である。電気的超伝導体のような、電気力線を離散的な単位に分割する働きをする材料は見つかっていない。しかしわれわれは依然、電場の電気力線が量子化されている電気超伝導体のようなものを想像できる。このアイデアを使うと、一見無関係に思える別の研究から得られた結果もうまく説明できることがわかった。それが、陽子と中性子がそれぞれ三つのクォークと呼ばれるもっと小さな実体からなることを示す実験である。

原子の内部に電子、陽子、中性子があるのと同じように、陽子と中性子の内部にクォークがあることについては十分な証拠がある。しかし違いが一つある。それはクォークは陽子の内部に捕らわれているように見えることである。これをクォークは「閉じこめられている」と言う。ここで理解しなければならないのは、電子を原子核の周りに保つのに電場があるように、クォークを閉じこめている力があるか、である。

多くの実験から、陽子の内部でクォークを保っている力が電気力にまったくよく似てい

ることがわかっている。たとえば、その力は電場および磁場の力線に似た、力線をつくる場によって伝達されることが知られている。これらの線は、電気力線が正と負の電荷（電気の荷量）をつないでいるように、クォークが担う荷量を連結する。しかしクォークのあいだの力は、一種類の荷量しかもたない電気力よりももっと複雑である。クォークには三種類の異なる荷量があり、それぞれ正負がある。これらの異なる荷量は「色」と呼ばれ、それを記述する理論は量子色力学、略してＱＣＤと呼ばれている（これは通常の色とは関係がなく、ただたんに三つの種類の荷量があることを示す生彩のある用語にすぎない）。二つのクォークが図９－３に示すように、ある色―電場の力線で結びついていると想像しよう。実験は二つのクォークがたがいに非常に近ければ、あたかも彼らのあいだの力が大して強くないかのように、ほとんど自由に動く。しかし、二つのクォークを切り離そうと試みれば、それらをつないでいる力は一定の値に高まり、その後はどれだけ引き離されても値は落ちない。これは距離が大きくなるにつれて弱まる電気力とは非常に異なる。

二つのクォークがある長さのひもで連結されていると想像しよう。このひもはどこまでも引き伸ばせるという奇妙な性質をもっている。図９－３に示すように、どれほど遠く離れても、クォークは依然ひもでつながっている。クォークを保っているこのひものイメージは、たいへん上手くいっており、多数の実験結果ともあてはまる。だが、ひもは何でで

きているのか？

　二つのクォークのあいだに張られたひもが超伝導体における磁束線のようにふるまうというのが、われわれがもっている大きな手掛かりである。これは簡単な仮説を暗示している。おそらく空虚な空間は超伝導体に非常に似ている。空間をぷつんと終わらせているのがクォークを保っている色荷の力線であって、磁束線でないことを除けば、だ。このイメージでは、クォークの色荷のあいだの力線は、磁場よりも電場の力線に似ている。だから、この仮説はたいへん簡潔につぎのように述べられる。空虚な空間は色—電場的な超伝導体である、と。これは過去数十年にわたる素粒子物理学のもっとも生産的なアイデアの一つだった。それはなぜクォークが陽子と中性子に閉じこめられているかとならんで、素粒子物理学の他の多くの事実を説明したのだ。しかし、真に興味深いのは、このアイデアは

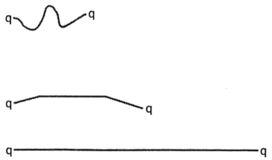


図9-3　クォークは超伝導体における量子化された磁束（図9-2）に類比される、量子化された場の束線からなるひもで結ばれている。この場はQCD場と呼ばれる。クォークが遠くに引き離されると、束線が伸び、クォークのあいだの力はクォークの距離がいくら大きくなっても同じである。クォークは決して引き離せないというのがその結果である。

二通りのまったく異なる見方ができる点だ。

色－電場を基本的な実体と見なし、ついでこのクォークのあいだに張られたひもという描像を、超伝導体の電気バージョンに似た性質をそなえた空間の結果として理解することもできる。

しかし、伸びたひもで結ばれた二つのクォークというイメージを理解するには、別の方法がある。これはひもそのものを何らかの場の力線でできていると見なす代わりに、基本的な実体と見なすことである。このイメージは最初のひも理論を導いた。初期のひも理論学者たちによれば、ひもは基本的であり、場はひもが、ある状況でいかにふるまうかを示す近似的なイメージにすぎない。

他方は、場の力線を基本とし、ひもはそれから導かれた実体である。どちらも研究され、どちらも実験結果を説明する上で何がしかの成功を収めてきた。だが、ほんとうに一方だけが正しいのか？　一九六〇年代にはただ一つしかイメージがなかった――ひものイメージだ。この時期に、二〇年ほど後に可能な量子重力論としてのひもの創造につながる種が蒔かれたのだった。ＱＣＤは一九七〇年代に創造され、基本理論としてもっと成功するように見えたので、速やかにひものイメージの地位に取って代わった。だが、ひも理論は一九八〇年代半ばに復活し、二十一世紀に入ったいま、両方の理論はともに盛んである。一

方が他方よりも実際により基本的かもしれないが、われわれはまだどちらとも決めかねている。

第三の可能性があるかもしれない。つまり、ひものイメージと場のイメージはどちらも同一のものを見る異なった見方にすぎないというのだ。それらは等しく基本的であり、どんな実験もこの問題に決着をつけられない。この可能性は多数の理論家を興奮させている。というのは、物理学をどう考えるかについてわれわれの本能を深いところで刺激するからだ。それは「二重性仮説」と呼ばれている。

この二重性仮説は量子論の波と粒子の二重性と同じではないことは強調しておかねばならない。しかし、それはあの原理すなわち相対性原理と同じくらいに重要である。相対性理論や量子論と同じように、二重性仮説もまた、二つの一見異なる現象が同じ事物を記述する二つの方法にすぎないとする。もしそれが真実ならば、物理学に対するわれわれの理解に大きな意味をもつ。

二重性仮説はまた、十九世紀の半ば以来物理学を苦しめていた論争、つまり世界には二種類の事物、粒子と場があるように見えるという問題を提起した。この二重記述は必然的であるように見える。というのは十九世紀以来知られているように、荷電粒子は、電場と磁場を介して相互作用する。これは多数の観測された現象の背後にある事実で、粒子間を

介して伝わるからである。情報が場のなかでは波動を情報が伝わるのに有限の速さを要するという事実も含まれる。

世界を説明するのに非常に異なった二種類の実体が必要であるという事実に悩まされた人も大勢いる。十九世紀には人びとは物質を用いて場を説明しようとした。アインシュタインが結果として廃棄した有名なエーテル説の背後にあるのがこの問題だった。近代物理学者は反対に、場を用いて粒子を説明しようとしている。しかし、それでもすべての問題がこれで解消されるわけではない。もっとも深刻なのは、場の理論が無限大の量に満ちているということにある。粒子に近づくにつれて、粒子の周りの電場の強さがしだいに大きくなる。しかし、粒子に大きさがないので、どこまでも近づくことができる。その結果、粒子に近づくにつれて場は際限なく増大する。近代物理学の方程式に多くの無限大が現れる原因がこれである。

この問題を解決するには二つの方法があり、どちらの方法も量子重力で役割を果たしていることがわかるだろう。一つの方法は、空間が連続的であることを否定し、粒子にどこまでも近づいていけなくすることである。もう一つの方法は二重性仮説をとる方法である。それには粒子をひもで置き換える。ある距離から先は、あるものが点であるか、小さなループであるか見分けがつかないから、これは上手くいく。しかし、二重性仮説が真なら、

ひもと場は同じものを眺める異なった仕方かもしれない。このやり方で二重性仮説を大事にすることで、物理学の理解を二世紀近くにわたって曇らせていた問題がいくつか解消するかもしれないのだ。

私は個人的にはこの仮説を信じている。そのわけを説明するには、一九七六年、大学院をはじめる前と後に出席した二つのセミナーの物語をするのがいいだろう。たまたまハーバード大学で私の面接があった日、ケネス・ウィルソンがＱＣＤをテーマに講義をした。ウィルソンはもっとも影響力のある理論物理学者の一人であり、いくつかの革新的なアイデアの生みの親で、そのいくつかのアイデアがその日のセミナーの話題になっていた。彼は空虚な空間を電気超伝導体のイメージで理解するめざましい方法を思いつき、これはそれ以来、私を含めた多数の物理学者のライフワークに多大な影響を与えている。

ウィルソンは空間は連続的ではなく、図９‐４で示したような具合に想像せよと要求した。つまり、規則的にならんだ線で連結された点をもつ、一種のグラフとして表現されるのである。このような規則的なグラフを「格子」と呼ぶ。ウィルソンは、格子の点の間隔は非常に小さく、陽子の直径よりもずっと小さい、と示唆した。格子がこれほど小さければ、実験では格子があるとはわからない。しかし概念的には、空間を格子と考えるのと、連続であると考えるのとでは大きな違いだ。ウィルソンは、格子の場の力線を引くことで、

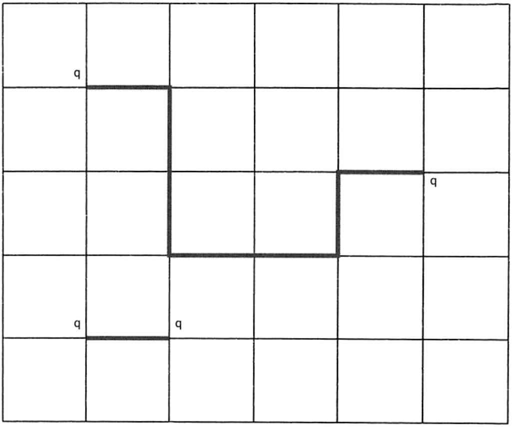


図9-4　ケネス・ウィルソンの考えたクォークとひも。空間はエッジ（稜）で連結されたノードでつくられた格子と想像された。格子をつくる線をエッジ、交差する点をノードという。クォークは格子のノードにしか存在できない。クォークを連結するひも、すなわち量子化された場の束線の管は、格子のエッジ上にしか存在できない。ノード間の距離は有限だが、陽子の大きさよりもはるかに小さいと想定される。簡略化のために、ここに示した格子は二次元に描かれている。

QCDの色—電場を記述する非常に簡単な方法を示した。空虚な空間が超伝導体に似ていることを示す代わりに、彼はたんに、力線が離散的な実体で、格子のあいだを動きまわれるものと想定した。そして、力線がどう動くか、たがいにどう相互作用するかを述べる簡単な規則を書き下した。

ケン・ウィルソンはつぎに、この疑問について考えたことのあるすべての人たちと完全に正反対の方向へ論をすすめた。彼は、普通の電気のように電荷が一種類であれば、電場の力線はかたまってグループをつくる傾向があり、力線が非常に長くなると離散性を失って、普通の電場の力線のようにふるまうことを示した。だから、彼は理論から日常の世界の経験を導いたのであり、その逆ではない。しかし、クォークの場合のように、三種類の荷量があるときには、荷量がどれだけ大きくなっても、つねに離散的に止まるだろう。そして、クォークのあいだには一定の力があるだろう。ウィルソンの理論を支配している規則は非常に単純である——事実、あまり単純なので子供にだって説明できるほどだ。

この「ウィルソンのループ」と呼ばれているものは、後に理論物理学者としての私の生涯の主要なテーマになった。私は後で実際にこのセミナーのことをよく検討してみた記憶はないが、セミナーでの説明はありありと覚えている。その時には、何年も後に気がつくような簡単な議論を定式化することもなかった。もし空間を連続的であるよりも離散的で

あると仮定して記述する方が、物理学にとって大いに単純であれば、この事実そのものが空間は離散的であることの強い論拠ではないだろうか？　もしそうなら、空間は非常に小さい尺度では、ウィルソンの格子に似た何ものかに見えはしないだろうか？

つぎの秋、私は大学院に入ったが、その年の暮れ近くのある日、私は理論物理学者が大騒ぎをしているのを見かけた。ロシアの理論家アレクサンドル・ポリヤコフが大学を訪れ、ちょうどその午後、講演をするというのである。その当時、ロシアには理論物理学の大きな学派があったが、そのメンバーが西側に来ることは滅多になかった。ポリヤコフはなかでももっとも創造的、カリスマ的な人物で、われわれはこぞって彼のセミナーに出かけた。愛想よく、気取らず、尽きせぬ信頼を秘めた人物だった。

彼ははじめに、自分がドン・キホーテのように愚かな夢の追求に生涯を捧げてしまったと語った。物理学では、災難は無限大や不合理な数学的表現にぶつかることから生じる。前に述べたように、こうした問題は連続的な空間と時間にもとづいたすべての量子論に現れる。ポリヤコフはセミナーで、これらの無限大にもかかわらず、電束のループに物理的意味を与えることができることを示した。もし彼が結果として生じる方程式を解くのに完全に成功しなかったならば、彼のセミナーは二重性仮説が真である——ひもは電場の力線と同じように基本的である——という信念をそっくり主張するものとなっただろう。

二重性というアイデアは依然、素粒子物理学とひも理論の背後にあって研究を駆り立てている原動力である。二重性は、ものごとを見るのに、ひもを用いるか、あるいは場を用いるかという二通りの方法があるという非常に単純な見解である。二重性が量子重力論にとって中心的な概念であることはわかっていた。その顚末は、いい科学的アイデアがその出発点からどのように遠くへ波及するかを示す典型的な物語である。というのも私は、ウィルソンにせよポリヤコフにせよ、そもそも自分のアイデアが量子重力論に適用されると彼らが考えていたかどうか、かなり疑わしいと思っているのだ。

多くのいいアイデアと同様、これも正しく進むためにはいくつかの青信号が必要である。ウィルソンとポリヤコフから聞かされたこと、さらに大学院一年生のときに格子理論についてゲラルト・トフーフト、マイケル・ペスキンとスティーヴン・シェンカーから受けた講義に励まされて、私はウィルソンの格子理論を用いて量子重力論の定式化に取りかかった。何人かの人から借りたアイデアを用いて、私は一つの理論をつくり上げ、それに一年間かそこらを費やした。その間、私家版の量子重力論に適用することで、ポリヤコフとウィルソンやその他の人たちが発展させたさまざまな技法を学ぶことができた。私は長い論文を書き上げて投稿し、反応を待った。当時はこれが普通のことだったが、唯一の応答は、遠い地方から論文のコピーを求める一束の葉書だった。もちろん、アメリカ陸軍研究所か

らも要請が来た。これは若い大学院生のしようとしていることにどんな軍事応用がありうるかを検討することで、どこかでだれかが給料をもらっていることを思い出させた。そう遠くない昔のことだが、ＩＢＭセレクトリック・タイプライターで紙に打ち出し、専門家にイラストを描いてもらい、それからコピーを別々に封筒に入れ、郵送したことを思い出すと隔世の感がする。このごろはラップトップで論文を書き、電子アーカイブにアップロードし、直ちにインターネットで閲覧可能になる。現代の学生がＩＢＭセレクトリック・タイプライターあるいはプレプリントを要求する葉書を見たことがあるかどうか、怪しいものだ。図書館へ行って雑誌に印刷された論文を見たことがないのが大部分じゃないだろうか。

数カ月後、私はその論文が基本的に間違っていることに気づいた。派手にやらかしたものので、過ちは致命的だった。それでも、会議の招待がいくつか舞い込んで来た。私はスティーヴン・ホーキングに呼ばれた機会を利用して、彼の組織した会議で、なぜ格子理論を使うのは量子重力には相応しくないかを説明したが、彼が喜んだとはとても思えない。人によってはこのアイデアが気に入っているようだったが、他にしようがなかった――これは悪いアイデアで、その理由を説明する責任が私にはある。

もう一つの会議で、私は論文のコピーをアショク・ダスと呼ばれる人物のメールボック

スに残した。彼は似たような研究に興味があるとのことだった。ブライス・デウィットは量子重力論研究の父だと正当に思われているが、同じボックスで手紙を探していて、私の論文を彼に宛てたものと思い込んだ。私の論文のあらゆる欠陥を承知の上でのことだと信じているが、それにもかかわらず彼は親切にも私をポストドクとして採用し、いっしょに仕事をしようと言ってくれた。私はブライスのミスのお陰で仕事にありついた。当時、私は量子重力論の研究者としては職業的自殺を冒したし、どんな職にもありつけないと言われていたのだ。

最初の論文で間違っていたのは、ウィルソンの格子を絶対的、固定した構造としていた点が、アインシュタインの重力理論の関係的な本性と齟齬をきたしてしまったのだ。だから私の理論は重力を含まず、相対性理論とはまったく関係ないものになった。この失敗から私が得た主要な教訓は、固定した背景に対して動く物体からは、うまい量子重力論はつくれないということだった。

そのころ、私はジュリアン・バーバーに出会った。彼は物理学者にして哲学者であり、オクスフォード近郊の小さな村に住んでいた。彼は博士号を取得したのち、空間と時間の本性について深く考える自由を得るために学界を離れた。彼はロシアの科学文献を英語に翻訳することで生活の資をかせぎ、通常の学者生活の圧力から遠ざかり、かなりの語学力

を駆使して空間と時間の理解の歴史に沈潜した。彼は空間と時間が関係的であるというアイデアの重要性を理解し、それを現代物理学に応用した。彼は、アインシュタインの相対性理論の数学的構造においてこのアイデアが演じている役割を深く理解した、最初の人物だと私は信じている。彼は最初は一人で、後にイタリア人の友人ブルーノ・ベルトッティといっしょに一連の論文を書き、空間と時間が関係性の側面以外の何ものでもないような数学的理論をどう定式化したらいいかを示した。ライプニッツあるいは他のだれかが二十世紀以前にこれをなしていたら、科学の進路はだいぶ変わっていただろう。

不幸なことに、一般相対性理論は普通、時空幾何学をつくりだす機械と見なされている。そして、まるでニュートンの絶対空間と時間と同様に扱われてしまっている。つまり、固定した絶対的な実体があり、そのなかで事物が運動していると見なされるのである。そうすると、答えるべき質問は、これらの絶対的な時空のどちらが宇宙の記述としてふさわしいか、である。相対性理論とニュートンの絶対的な空間と時間との違いは、ニュートンの理論には選択の余地は全然ないが、一般相対性理論は可能な時空を選択できる点にある。いくつかの教科書には相対性理論がこのように説明されているし、もっと知っていて然るべき哲学者のなかにもこのように解釈している人がいるようだ。

ジュリアンはもちろん一般相対性理論を正しくとらえた唯一の人ではない。ジョン・ス

タチェルもまた、アインシュタインの著作集出版準備のためのプロジェクトの最初の責任者として仕事に携わることを通して、少なくとも部分的にこの理解に達した。しかしジュリアンは、一般相対性理論の研究に向かうにあたって、他のだれももたない道具を装備していた——時空がダイナミカルに発展する関係以外の何ものでもないという、この理論の一般的な数学的定式化だ。

それ以来、ジュリアン・バーバーは相対性理論の研究をしている人たちの多くに知られ、最近は時間の本性に関する革新的な理論の発表でいっそう広く知られている。だが、一九八〇年代初期には彼の仕事を知る人は少なく、格子理論が行きづまっていることを悟った直後に私が彼に出会ったのは実に幸運だった。この出会いのあいだに、彼は一般相対性理論における空間と時間の意味と、それにおける関係概念の役割を説明してくれた。なぜ私の理論のどこにも重力がないのか。それを計算が示していることを理解する概念言語をこれが私に与えてくれた。私が必要としていたのは、ウィルソンの格子理論に似ているが、固定した格子がなく、すべての構造がダイナミカルで関係的であるような何かを発明することだった。エッジでつながった点の集まり——つまりグラフ——は、関係性で定義されるシステムを表すいい例である。しかし私が間違いを冒したのは、固定したグラフを理論の基礎にすえたことだった。グラフをつくりだすことから理論をはじめるべきで、あらか

じめ存在しているどんな幾何学あるいは構造も反映してはならないのである。むしろウィルソンが格子上でループの運動に与えたのと同じくらいやさしい規則にしたがって展開しなければならない。だが、これを可能にする方法が現れるには一〇年待たねばならなかった。

この一〇年のあいだに、私はさまざまな素粒子物理学のテクニックの応用を試みたが、すべて不成功に終わった。これらのテクニックはすべて、単一の古典的時空幾何学を想定しているという意味で背景依存であり、グラヴィトンと呼ばれる量子化された重力波がこの背景上でどう動き、相互作用するかを研究するものだった。われわれは多数のアプローチを試みたが、すべて失敗した。その他に私は、指導教官の一人であるスタンレー・デッサーやその他の人たちが提唱した、超重力という新しい理論についていくつかの論文を書いたが、これらの試みも実を結ばなかった。ついでブラックホールのエントロピーの含意についていくつかの論文を書いて、量子力学の基本問題との連関についてさまざまな推測をしてみた。いま読み返すと、これが当時私がした唯一興味深いことのように思えるが、とても多くの人たちがそれを読んでくれたという証拠はない。量子ブラックホールのアイデアを量子論の基本論点に適用しようとする若い人たちの興味を引くこともなければ、そういう需要もなかったのは確かだ。

振り返ってみると、どうして私がキャリアをつづけてこれたか不思議でならない。一つ確かな理由は、その当時は量子重力論をやる人は少なく、競争が激しくなかったことだ。私自身があまりうまいやり方でなかったと報告しているにもかかわらず、実際に何を得たわけでもないのに、人びとは私が素粒子物理学のテクニックを量子重力論に応用した部分に関心を示したようだ。いずれにせよだれもあまり深くは入らなかったので、新しいことを試みる人たちが古い人たちの研究プログラムにもぐり込んだり、ある分野から盗んだアイデアを別の分野に応用しようとする人たちにも余地はあった。今日のような状況であったら私にキャリアが勤まるものかどうか大いに疑っている。はるかに競争は激化しており、仕事を管理しているのは、自分たちは正しい道にそって量子重力論を研究しているという自信に満ちた年配の人たちだ。この自信があるから、彼らは——いや「われわれ」というべきか、私自身がいまやポストドクを雇う立場の一人だ——若い研究者の示す情熱を、自身の研究プログラムに対して示す期待の現れとして、使う理由を正当化できる、と感じている。

私にとって、この領域で働いている多くの人たちと同じく、可能な量子重力論としてのひも理論の復活が転換点となった。ひも理論にはつぎの章で触れることにする。いま言えることは、量子重力への誤ったアプローチの創造から失敗までをまるまる経験した以上、

私は多くの他の物理学者同様、ひも理論が何をなしてくれるかについてきわめて楽観的だった。それと同時に、私はまた、事物が固定した背景の時空で運動するという考えにもとづいていれば、どんな理論も成功しないだろうと確信していた。そして、ひも理論はある種の問題の解決にたしかに成功していたが、依然としてこの考えにもとづく理論だった。それは、背景のなかを動いているのが粒子あるいは場ではなく、ひもだという点が従来の理論と異なっているだけだ。だから、ひも理論は量子重力論に向かう重要な一歩であるかもしれないが、完全な理論ではありえないことは、私をはじめ少数の者にははじめから明白だった。しかし、それにもかかわらず、他の大勢の物理学者に起きたように、ひも理論は私の研究方向を変えた。私は背景独立な理論をつくる方法を探しはじめた。時空を固定した背景と見なせるある状況下で、ひも理論は有用な近似に還元できるだろう。

このプロジェクトのためのインスピレーションを得るために、私は大学院生当時の私をあんなに興奮させたポリヤコフのセミナーを思い出した。私は彼が用いた方法が使えるかどうか迷っていた。それは色―電気的束線のループであるような基本的な物体を用いてQCDを表そうという試みだった。私は途中に格子が入り込まない理論を必要としていたが、彼はうまい具合に格子なしで仕事をしていた。私は一年間ほどルイス・クレインとこのアイデアでいっしょに仕事をした。当時の私はシカゴ大学のポストドクで、ルイス・クレイ

ンは大学院生だった。彼は私よりも年上だったが、実際は、早熟の天才で、シカゴ大学が十代の前半での入学を許可した一連の傑出した科学者と学者の最後の一人だった。彼はカンボジア侵攻に反対するストライキを指導したかどで大学院を追放されるという不運に見舞われたが、一〇年ほどして大学院にもどってきた。その後ルイスは量子重力論に関するわれわれのアイデアの発展に重要な創造的な貢献をした、一握りの数学者の一人になっている。彼の貢献のあるものはこの分野の発展にとって実に実りの多いものだった。そのころ彼の友人だったのは実に幸運だったし、いまも友人であることを私は自分の幸運に数えている。

ルイスと私は二つのプロジェクトでいっしょに働いた。一つめのプロジェクトでは、相互作用する量子化された電束のループのダイナミクスにもとづいた重力理論を定式化しようと試みた。ひも理論を定式化することには失敗し、その結果、この研究はなにひとつ発表できなかったが、非常に重要な結果をもたらすことになる。二つめのプロジェクトでは、小さい尺度では時空が離散的であるとする理論によって、量子重力論の問題を多数解決できることを示した。これは時空構造がプランク尺度でフラクタルに似ているという仮説の意味を研究することによって、なしとげられた。これは無限大を除去し、理論を有限にすることで、量子重力論の困難を数多く克服した。この仕事を通じて、このようなフラクタ

ルな時空をつくる一つの道は、相互作用するループのネットワークからつくり上げることだと理解した。どちらもルイス・クレインとの共同を通じて、発展するループのネットワークのあいだの関係にもとづいた時空の理論を構築しなければならない、と納得させられたのだった。問題はいかにこれに取りかかるか、である。

これがアインシュタインの一般相対性理論をどう理解するかを、完全に一変する発見がなされたときの状況だった。

10 ノット、リンクとキンク

ルイスと仕事をしていた歳月のうちに、アミタバ・センという名前の若いポストドクが二つの論文を出版した。この論文に散りばめられているめざましい公式には、アインシュタインの重力論のいくつかが、アインシュタイン自身が用いたよりもはるかに簡単な、はるかに美しい方程式で表現されていた。われわれは、何とかしてこのはるかに単純な定式化の上に量子重力論を打ち建てることができたら、何が起きるだろうかを論じ合った。しかし、その当時は、だれ一人何もできなかった。

センの方程式を真剣に受け止めた一人がアブヘイ・アシュテカーだ。アブヘイは古典的相対論者として訓練を受けていた。数学的な傾向のあったアシュテカーは、センの方程式にアインシュタインの一般相対性理論の完全な再定式化の核心が含まれているのを認め、一年後には自分でまさにそれを完成させた。一般相対性理論の新しい定式化をおこなったのである。それは二つのことをなしとげた。理論の数学を大幅に簡単にし、それをQCDで用いられているのに非常に近い数学的言語で表現した。これこそまさに量子重力を実際の主題に変換するのに必要なものだ。

私はイェール大学で助教授になったばかりだったが、アブヘイを招いてイェールで話をさせた。出席者のなかに大学院生ポール・レンテルンがいた。彼はハーバードの出身で、やはりセンの論文を研究していた。アシュテカーの定式化がさらなる進歩の鍵となるだろうことはわれわれには明らかだった。

私はやっと家にたどりつくと、早速センとアシュテカーの新しい定式化に、ルイス・クレインと私がひも理論を再発明しようとしてしくじっているあいだに発展させた方法を適用した。数週間後に、サンタ・バーバラの理論物理学研究所で一学期にわたる量子重力のワークショップがはじまった。もう一つ、幸運があった。私は大学に勤めたばかりだったが、当局者を説得して一学期間セミナーに参加させてもらうことができた。そこに入るや否や、

私は二人の友人テッド・ジェイコブソンとポール・レンテルンを仲間にした。われわれはすぐに、もし重力場の束線に対して電気超伝導体にたいへんよく似た何かを使えば、直ちに空間の量子構造の非常に簡単な描像が現れることを発見した。最初、私はポールと仕事をしていた。連続的空間に無限大が現れるのを避けるため、われわれはウィルソンの格子に似た格子を用いた。新しい形のアインシュタインの方程式は、格子上でループがどのように相互作用するかについて非常に簡単な規則を意味することに気づいた。しかし、一〇年前にぶつかったのと同じ問題にぶつかった——固定した格子を使うことで課せられる背景をいかに免れるか？

テッド・ジェイコブソンが、ポリヤコフを真似て格子なしで作業しようと提案した。その結果は第3章ですでに述べた。翌日、黒板の前に立ってわれわれは、それまでだれも思いも寄らなかったこと、だれも眺めたことさえなかったことを見つめていた。それは量子重力論の完全な方程式の厳密な解であった。

われわれがなしたことは、量子論を構築する通常の方法を、センとアシュテカーが発見した簡単な形の一般相対性理論の方程式に応用することだった。これが量子重力論の方程式に通じる。これらの方程式はブライス・デウィットとジョン・ウィーラーによって一九六〇年代にはじめて書き記されたものだが、われわれはその新しい、劇的に簡単な形を見

いだした。これらの方程式に、空間と時間の幾何学のとりうる量子状態を記述する公式をはめ込まなければならない。思わず私はルイス・クレインと私が慣れている方法で取り組んだ。これらの状態を、量子化された電場のループを記述するのにポリヤコフが用いた式から、直接組み立てるのだ。するとループが交わらないかぎり、方程式を満たすことがわかった。それらは図10－1のループのように見える。

さらにいくつかの解を見いだすのにもう何日かの厳しい労働が必要だった。われわれは、ある単純な規則にしたがうかぎり、たとえループが交わっていても、それらを組み合わせることで解をつくりだすことができることを見いだした。実際、これらの状態を無限に書き出すことができる――なすべきことはただ、ループを描き、それらが交わるときにはいつでもある簡単な規則を適用することである。

この数日のあいだに見つけたことの意味を考えだすために、われわれを含めて大勢の人たちの長い年月が必要だった。しかし、スタートの時点においてすら、それ以前のどんな理論にもできなかったことができる量子重力論であることははっきりわかっていた。

この描像を完成するにはもう一歩進まなければならない。解がほんとうに背景空間から独立していることを証明しなければならなかった。それにはこれらが異形束縛と呼ばれる一連の付加的な方程式の解であることを示す必要があった。これらは理論のやさしい方程

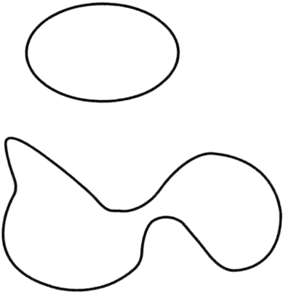


図10－1　ループを用いてループ量子重力論で表現された空間の幾何学の量子状態。ループ内にキンク（よじれ）がないかぎり、これらの状態は量子重力論の方程式の厳密な解である。

式と見なされた。矛盾するようだが、われわれが簡単に解けた方程式、つまりいわゆるウィーラー－デウィット方程式は解くのがむずかしいとされていたものだ。最初は楽観していたが、まもなく両方の組を解けるように量子状態を工夫することは不可能であることに気づいた。どちらか一方を解くことは容易だが、両方を解くことはむずかしい。

イェール大学に戻った翌年、ルイス・クレインとともにこの問題にとりくみ、多くの時間を無駄にした。われわれはそれが不可能であるとほぼ確信していた。結果が容易に見て取れることをするのは、非常にいらいらさせられる。

ある日私は、サンタ・バーバラのわが家の庭に座っているとき、このことに気がついた。量子重力は、たがいに交わり、ノット（結び目つくり）し、リンク（環つくり）するループの理論に還元できるだろう。これがプランク尺度での量子幾何学の記述をもたらす。私はポールおよびテッドとした仕事から、われわれが考案した量子版のアインシュタイン方程式が、ループがたがいにリンクし、ノットする仕方を変えうることも知っていた。ループのあいだの関係は劇的に変化しうる。

私は家のなかに戻り、ルイス・クレインに電話した。ループがどのようにノットし、リンクするかについて数学者が何か知っているかと聞いてみると、そうだ、ノット理論と呼ばれる分野があって、まるまるそのことを扱っている、と彼は答えた。そして私がノット

理論の権威ルイス・カウフマンとシカゴで何度かいっしょに食事をしたことを思い出させてくれた。最後のステップは、理論から空間のループの所在に関する依存性を取り除くことだった。これによって、われわれの理論はノット、リンクおよびキンク（よじれ）の研究に帰着した。この呼び名は、アメリカの指導的な相対論研究者ジェイムズ・ハートルがのちにふざけてつけたものだ。しかし、これはそれほど容易ではなく、われわれは一年以上もこの最終ステップを進むことができなかった。

サンタ・バーバラのワークショップは会議とともに終わったが、そこでわれわれの新しい結果がはじめて提出された。私はそこで、学位を取ったばかりのイタリアの若い科学者カルロ・ロヴェリと会った。私たちは多く語らなかったが、間もなく彼はイェールへ私たちを訪ねていいかと、手紙を書いてきた。彼はその十月に着き、ルイス・クレインのアパートに部屋を取った。私はカルロに、滞在は歓迎するが、おそらく仕事のいまの状態から見ると、イタリアに帰った方がよさそうだ、と語った。気まずい瞬間だった。そこで話題を変えようとしてヨットが好きかと尋ねた。彼は大好きだと言い、研究をしない日は、イェールのセーリングチームがボートを保管している港にまっすぐ行って、一漕ぎするんだと語った。

その翌々日、彼は私の研究室のドア口に現れて、こう言った。「問題、全部解けました

よ」カルロは、進展を妨げているのは場への依存だと見抜いた。さらに彼は、依存を取り除くには、彼の指導教官インペリアル・カレッジのクリス・イシャムの量子重力論アプローチを使えることに気づいた。カルロはそれをループに適用することで、まさに必要としていたことを手に入れたのだ。全体の描像をおおまかに出すのに一日以上かからなかった。結果として、ポリヤコフが偉大な夢と呼んだような理論が得られた。それは単純かつ厳密に解ける方程式で、現実の世界の一側面を記述する、純粋なループ理論だ。アインシュタインの重力理論の量子版を構築するのにそれを用いるとき、理論はループどうしの関係にだけ――いかにノットし、リンクし、キンクするかだけに――依存する。数日のうちに、われわれは量子重力論のすべての方程式の無限個の解をつくれることを示した。

数週間後、われわれはシラキュース大学に行った。そのころにはそこはアシュテカーとセンからはじまった研究の中心地になっており、カルロはそこで量子重力論に関する新理論について最初のセミナーを開いた。アブヘイ・アシュテカーは、量子重力論だと思われるものを見たのはこれがはじめてだ、と語った。それから数週間後に私が、インドでの会議に出る途中、ロンドンでクリス・イシャムの面前で新しい理論について二回目のセミナーを開いた。

インドでは、会議のオーガナイザーにカルロを引き合わせたが、それはいわば二つの古

代文明の出会いだった。カルロは招待されていなかったが、衝動的に決心し、飛行機に飛び乗ってきたのだ。オーガナイザーは高名な紳士だったが、カルロの長い髪と、二日ほど一人でボンベイの裏町をさまよっているあいだに手に入れたというサンダルと衣服を見やり、早口で言った。「ミスター・ロヴェリ、あなたは会議が締め切られたという私の手紙を受け取りませんでしたか？」カルロは微笑して答えた。「ええ、でも、あなたも私の手紙を受け取りませんでしたか？」結局、彼にはホテルの最上の部屋が与えられ、エア・インディアは彼のためにローマへのファーストクラスの切符を進呈した。

こうして、いまではループ量子重力論と呼ばれているものが誕生した。私たちが発見した量子重力論の方程式の解の意味を明らかにする作業は、最初はカルロとしていたが、次第に友人や同僚が増え、一種の共同研究としておこなわれた。それでも何年もかかった。一つの直接的な結果として、量子幾何学がたしかに離散的だということがわかった。われわれがおこなったことはすべて、超伝導体の磁力線のような離散的な力線というアイデアにもとづくものだった。

これらの結論に到達するために、われわれは場の量子論のすべての数式を苦しめている無限大を取り除く方法を見いださなければならなかった。私は理論には無限大はないはずだという直観をもっていた。過去にジュリアン・バーバーと交わした会話と私がルイス・

クレインとおこなった仕事からピンときたものだ。無限大は、プランク尺度での空間と時間の構造についての仮定に何らかの誤りがあって生じるのでは、と大勢の物理学者は推測している。

私の経験では、一人の科学者はいいアイデアをほんの二つ三つしかもてないというのは、たしかに真実だ。いいアイデアというものはきわめて稀で、あいだを置き、長年の準備の後でようやく訪れる。もっと悪いのは、よいアイデアがいったん手に入ると、それを発展させるために何年も重労働を宣告されることだ。面積と体積は離散的ではないかというアイデアは、騒がしいガレージで車の修理を待っている一時間のあいだに、ある量子幾何学の体積を計算しようとしていたとき、一瞬のうちに思いついたのだった。ノートブックは多数のごたごたした積分でいっぱいだったが、突然そこに計算のための公式が現れるのを私は見た。私は結果が実数であるという仮定に立ってある量を計算しはじめたが、その代わりに、すべての可能な答えがある単位では整数になることに気づいた。これは面積と体積は任意の値を取ることができず、固定した単位の倍数として現れるということだ。これらの単位は存在しうる最小の面積と体積に対応する。私はこれらの計算をカルロに見せた。そして数カ月後、イタリア北東部の山中にあるトレント大学でいっしょに仕事をしているあいだに、彼は面積の基礎的単位がゼロを取りえないことを示す論拠を考えだした。これ

は、われわれの理論が真ならば、空間が「原子」構造をもつという結論は避けられないことを意味する。

私はトレントでの仕事を別の理由でも覚えている。その前年、われわれの学生の一人ベルント・ブルーグマンがたいへん困った顔つきで私の研究室にやってきた。文献を徹底的に調べ上げたところ、これまで聞いたことのない二人の研究者が、すでにわれわれのものと非常によく似た方法を適用していることがわかったのである。二人の名はロドルフォ・ガムビニとアンソニー・トリアス、それぞれモンテヴィデオ（ウルグアイの首都）とバルセロナで研究していた。

悄然として、われわれはできる唯一のことをした。それは黙ってお詫びの気持ちのこもった手紙を書くことだった。しばらく返事がなかったが、ある日、トレントにいるカルロがバルセロナから電話を受けた。彼らは、明日までそこにいるか、と尋ねた。彼らはほとんど夜通しフランスと北イタリアを車で走り抜け、翌日トロントに着いた。われわれはたがいに仕事を見せあって楽しい一日をすごしたが、ありがたいことに仕事は相補的なものだった。彼らは方法をＱＣＤに適用し、われわれは量子重力に適用した。アンソニー・トリアスがほとんどの話をし、ロドルフォ・ガムビニは後ろに引っ込んでいて、最初は口を開かなかった。しかし、われわれはまもなくロドルフォが第一級の創造的な科学者だとい

うことに気づいた。つぎの数カ月のうちに、ループ量子重力論で計算をするための新しいアプローチを速やかに考えだしたことからも、彼の創造性の高さを思い知ることになった。

それ以来、ガムビニは量子重力論の分野における指導者の一人になり、しばしばペンシルヴァニア州立大学のジョージ・プリンと彼がモンテヴィデオで教えた非常に若い研究者グループと仕事をしている。彼らは量子重力論の方程式の解を数多く発見しており、その途上で現れたいくつかの重要な問題を解決した。

もの静かな性質にもかかわらず、ロドルフォ・ガムビニは軍事独裁によって徹底的に破壊されたヴェネズエラとウルグアイに、物理学を復活させようとほとんど独力でとりくんでいた。私ははじめてモンテヴィデオに彼を訪ねたときに、それがどういうことか痛感させられた。真冬だった。われわれはロドルフォと彼の仲間たちとくずれかかった修道院で物理学をやった。ヒーターもコンピュータもないところで、ブンゼンバーナーでたえず温められているマテ茶をひっきりなしに飲みながら寒さと戦った。いまではウルグアイ大学理学部は、モダンな校舎に近代的な設備を備えている。それはロドルフォが余暇の時間に集めた資金で建てられたものだが、そのあいだも新しいアイデアと計算はたえずなされたのだった。

ループ量子重力論から得られるもっとも美しい結果の一つは、ループ状態を配置すると

非常に美しい画像になるという発見である。このループ状態はスピンネットワークと呼ばれるが、これは三〇年前にロジャー・ペンローズが実際に発見した。スピンネットワークは要するに図10‐2から10‐5に示したようなグラフで、エッジには整数のラベルが付けられている。これらの整数は量子論で粒子がもつことを許されている角運動量の値からきており、プランク定数の半分の整数倍に等しい。

私は長い間、ペンローズのスピンネットワークがループ量子重力論に入ってくると知ってはいたが、それを使って仕事をするのを恐れていた。ペンローズが講演で説明するのを聞いたことはあったが、かなり込み入っていて、彼以外には間違えずにやれそうもなかった。ペンローズのやり方で計算すると、+1、0あるいは−1の長い列を足さねばならない。記号を一つ間違えれば、アウトだ。それでも一九九四年、ケンブリッジにロジャーを訪ねたとき、私は彼にお願いしてスピンネットワークの計算の仕方を教えてもらった。一つの計算を彼といっしょにしてみて、私はこつを飲み込んだ。スピンネットワークで最小可能な体積のような量子幾何学の側面の計算が可能になると確信するにはそれで十分だった。私はその後で、教わったことをカルロに見せ、ひと夏費やして、われわれの理論をペンローズのスピンネットワークの言葉に翻訳した。

これをしてみると、個々のスピンネットワークが空間の幾何学に対する可能な量子状態

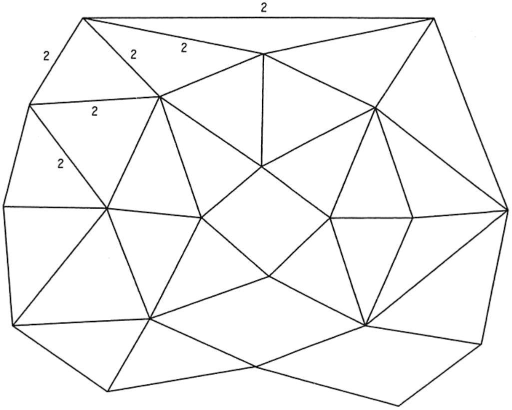


図10－2　ロジャー・ペンローズが発明したスピンネットワークは、空間の幾何学の量子状態も表す。それはエッジの上に整数をつけた一つのグラフからなる。ここでは少数の数しか示されていない。

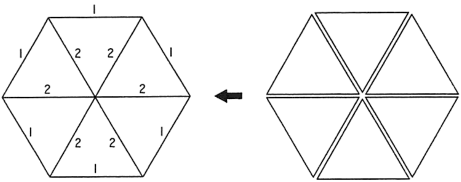
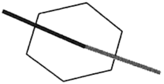
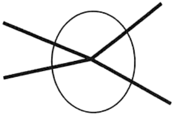


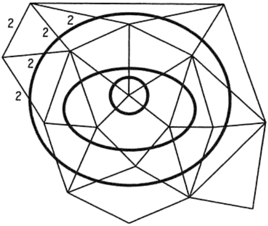
図10－3　スピンネットワークはループを組み合わせることでつくりだせる。

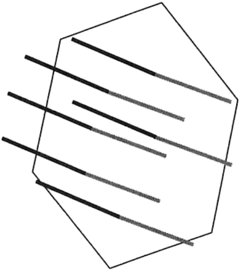


スピンネットワーク
のエッジとの交わり
から表面の面積が生
まれる。交わりが増
えるにつれ、面積も
増える。



スピンネットワーク
のノードから領域の
体積が生まれる。





図に示された各々の領域は、
それが囲む領域よりも大き
な体積をもつ。もっと多く
のスピンネットワークのノ
ードを含むからである。

図10－4　ループ量子重力論が予測する空間の量子化。スピンネットワークのエッジは離散的な面積の単位、つまり最小量の面積を担っている。曲面の面積はスピンネットワークの一つのエッジと曲面が交わることから生まれる。可能な最小面積は一つの交わりから生じ、ほぼ10^{-66}平方センチメートルである。スピンネットワークのノードは離散的な単位を担っている。可能な最小体積は一つのノードから生じ、ほぼ10^{-99}立方センチメートルである。

を与えることを見いだした。ネットワークのそれぞれのエッジにつけた整数は、そのエッジがもっている面積の単位に対応していた。一定の電束あるいは磁束をもつ代わりに、スピンネットワークの線は単位面積をもっている。また、スピンネットワークのノードも簡単な意味をもっている。それらは体積の量子化された単位に対応する。単純なスピンネットワークに含まれている体積はプランク単位で測れば、基本的にはネットワークのノードの数に等しい。この描像を解明するのにはかなりの労力と心労がかかる。ペンローズの方法は私が予想していたとおり貴重なものだったが、これを使って仕事を進めるのは容易ではなかった。途中で私はかつてリチャード・ファインマンから聞いた真理を改めて学んだ。よい科学者とは、あらゆる可能な誤りを冒してはじめて正しい答えにぶつかる、のだそうだ。

おそらく科学者として私が経験した最悪の瞬間はワルシャワ会議のときだ。そこでレナーテ・ロルという、むかしロンドンでクリス・イシャムの学生だった若い物理学者が、彼女の発表の最後にわれわれの最小可能な体積の計算が誤っていると宣告した。長い議論の末、彼女の正しいことが判明した。われわれは誤りのもとがたった一つの記号の誤りだということを突き止めた。しかし幸い、われわれの基本的な描像と結果は保たれた。われわれの結果はそれ以来、数理物理学者によって厳格な数学的定理に支えられていることが示

され、確認されている。

量子重力へのループ・アプローチはいま、研究分野として活況を呈している。超重力や量子ブラックホールの研究など、以前のアイデアがそれに取り入れられている。量子重力論への他のアプローチとの関連も発見されている。たとえばアラン・コンヌの幾何学への非可換的アプローチ、ロジャー・ペンローズのツイスター理論、ひも理論などだ。

この経験から学んだ教訓の一つは、背景と素養の異なる人たちが力を合わせてフロンティアを支えるとき、科学の進歩がどんなに速いかである。理論物理学者と数理物理学者の関係はかならずしもいつも滑らかではない。それは真先にフロンティアを探険した偵察隊と、その後からやってきて土地を囲い、耕した農夫の関係に似ている。農夫である数学者はすべてを縛りつけ、アイデアあるいは結果の厳密な境界を決定するが、偵察隊である物理学者は、アイデアがそのまま野性的で、飼い馴らされないことを望む。いずれも自分たちの仕事を本質的だと考える傾向がある。しかし、われわれとひも理論家のどちらも学んだのは、仕事の仕方も考え方も異なっていたとしても、数学者と物理学者がたがいにコミュニケートし仕事ができるようになるのが不可欠だということだった。一般相対性理論がそうだったように、量子重力論にも新しい数学が必要だ。新しい概念、アイデアそして計算方法が必要なのだ。

結局、ループ量子重力論によって与えられる空間の描像でもっとも満足が行くのは、完全に関係的なものだ。スピンネットワークは空間のなかにあるのではない。その構造全体が空間をつくりだすのだ。そして、構造とは、エッジ同士がノードでどう結びついているかに支配される、関係の構造以外の何ものでもない。また、エッジがたがいにどのようにノットし、リンクするかという規則も符号化されている。幾何学の古典的および量子的描像のあいだに完全な対応があることもまた満足できる。古典的幾何学では、領域の体積と表面の面積は重力場の値に依存する。それらは計量テンソルと呼ばれる数学的関数のある複雑な集まりのなかに符号化された。他方、量子的描像では幾何学はスピンネットワークの選択に符号化されている。任意の古典的幾何学が与えられたとして、ある近似のレベルで同じ幾何学を記述するスピンネットワークを見いだすことができる点で、これらのスピンネットワークは古典的記述に対応する（図10-5）。

古典的な一般相対性理論では、空間の幾何学は時間とともに発展する。たとえば、重力波が表面を通過するとき、表面の面積は振動する。これと同じ状況を量子的に見た場合、そこではスピンネットワークの構造が重力波の通過に反応して時間とともに発展しうる。図10-6はスピンネットワークの、時間とともに発展する簡単なステップのいくつかが示されている。もしスピンネットワークが発展すれば、われわれは離散的な時空構造を得る。

この離散的時空のできごとが、図10‐6に示された形の変化が起こる過程である。われわれは発展するスピンネットワークの像を描くことができる。それらは10‐7ないし10‐9の図に似ている。発展しているスピンネットワークは時空に非常によく似ているが、連続的というよりは離散的である。できごとのあいだに因果関係があり、したがって光円錐がある。しかしそれだけではない。というのは、それぞれの瞬間に対応してそこを通るスライスを描くことができるからである。

ジョン・ウィーラーは、プランク尺度では時空はもはや滑らかではなく、泡のようなものだとよく言っていた。それを彼は時空の泡と呼んだ。ウィーラーへの賛辞のなかで、数学者ジョン・バエズは発展するスピンネットワークを「スピンの泡」と呼ぶことを提案した。スピンの泡の研究は一九九〇年代半ばに突然起こった。これはいまや非常に活発な研究分野なのである。図10‐10に、スピンの泡理論のアイデアにもとづいた、空間次元1、時間次元1の世界のコンピュータ・シミュレーションを示してある。これはヤン・アンビヨルン、コスタス・アナグノストポウロスとレナーテ・ロルの作品である。これらの宇宙は非常に小さく、各々のエッジは一プランク長さに対応している。これらはかならずしも滑らかには発展しない。その代わりに、宇宙の大きさがときどき突然飛躍する。これらは幾何学の量子ゆらぎである。何年か後には、われわれはここで時空の幾何学の本物の量子

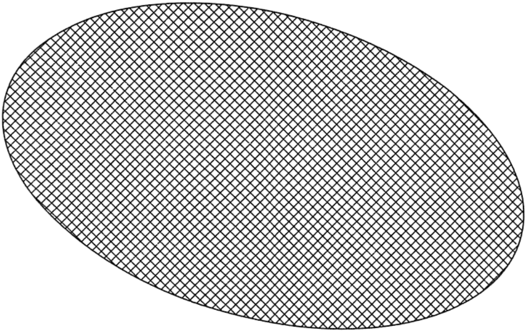


図10-5　非常に大きなスピンネットワークは、プランク長さよりもはるかに大きな尺度で見れば、滑らかで連続的に見える量子幾何学を表す。われわれは古典的な空間の幾何学は非常に大きく複雑なスピンネットワークでつくられるという。スピンネットワーク描像では、空間はただ連続的に見えるにすぎない――それは実際には、スピンネットワークのノードとエッジを積み上げてできているのである。

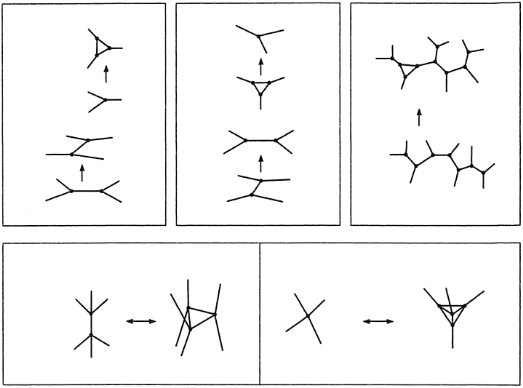


図10-6　スピンネットワークが時間とともに発展できる簡単ないくつかの段階。それぞれが空間の幾何学の量子転移である。これらはアインシュタイン方程式の量子論的類推である。〔F・マルコプールー＝カラマラ、〝スピンネットワーク進化の双対定式化〟gr-qc/9704013　本書で引用された参照論文はすべてgr-qc/××××としてhttp://xxx.lanl.gov/のgr-qcアーカイブで利用可能である〕

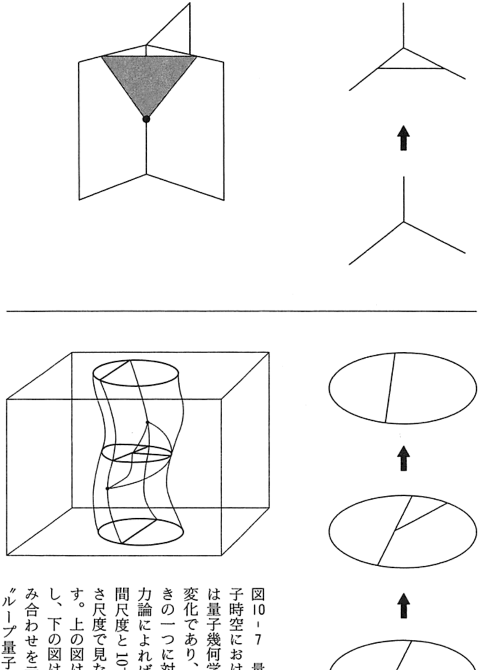


図10－7　量子時空の二つの像。量子時空におけるそれぞれのできごとは量子幾何学の空間における簡単な変化であり、図10－6に示された動きの一つに対応する。ループ量子重力論によれば、これは10^{-43}秒の時間尺度と10^{-33}センチメートルの長さ尺度で見たとき、見える時空を表す。上の図は単一の要素的動きを示し、下の図は二つの要素的動きの組み合わせを示す。〔C・ロヴェリ、〝ループ量子重力論における物理的状態の射影子〟gr-qc/9806121〕

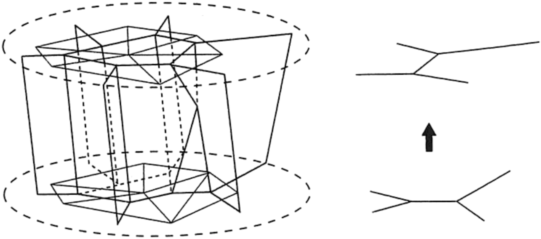


図10－8　スピンネットワークのあいだの量子転移に対するもう一つの要素的動きと、それを表現する時空描像。〔R・ド・ピエトリ、″カノニカル・ループ量子重力論とスピンの泡モデル″ gr-qc/9903076〕

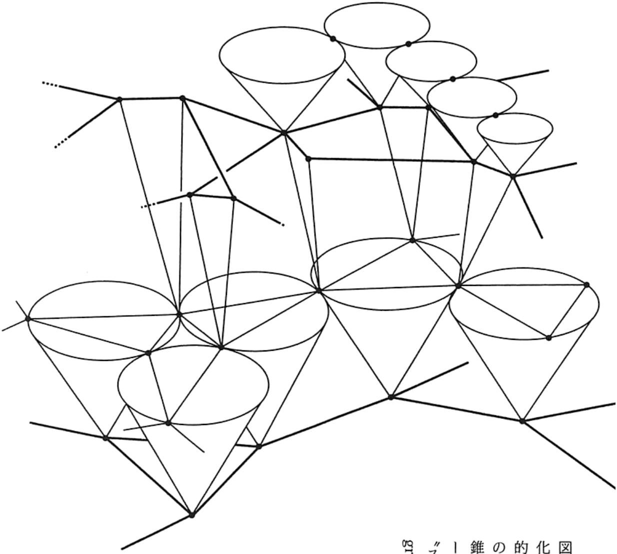


図10－9　スピンネットワークが変化するところでの、できごとの因果的未来を示す、量子時空のもう一つの像。これらは第4章のように光円錐として描かれる。〔F・マルコプールー＝カラマラとL・スモーリン、〝スピンネットワークの因果的発展〟gr-qc/9702025〕



図10-10　空間次元1と時間次元1をもつ宇宙を示す、量子時空のコンピュータモデル。示されている構造は10^{-33}センチメートルと10^{-43}秒の尺度で存在する。量子幾何学は不確定性原理のために、非常に強くゆらぐ。原子内の電子の位置についていえば、このような小さな宇宙では量子ゆらぎは宇宙の寸法に比して非常に重要である。なぜなら宇宙そのものと同じ大きさだからである。〔これらのシミュレーションはヤン・アンビョルン、コスタス・アナグノストポウロスとレナーテ・ロルの作品。これらは以下のウェブページで見ることができる。http://www.nbi.dk/~ambjorn/lqg2/〕

論に出会うだろう。

理論は正しいか？　われわれはまだ知らない。結局、それは面積および体積の離散性その他の時空幾何学の尺度について理論の予測したことが実験で検証される日が来るのを待つしかない。この予測は一般相対性理論と量子論の原理の組み合わせから直接導かれることであるとはいえ、ループ量子重力論にとって物語が完全に真である必要はないことは強調しておきたい。とりわけ、面積と体積の量子化のような理論の主要な予測は、多数の細部が正しいか正しくないかによらず、ただ量子論と相対性理論から引き出されたもっとも一般的な仮定のみに依存している。世界に他にどんなものがあるか、どれだけの次元、あるいはどんな基本的な対称性があるかを、予測は制約しない。とりわけ、それらは余分な次元と超対称性の存在を含め、ひも理論の基礎的特性と完全に合致する。私には予測が真であることを疑う理由がない。

もちろん、結局は実験で決めるしかない。非常に想像力豊かな若いイタリアの物理学者ジョヴァンニ・アメリノ＝カメリアは、空間の幾何学がプランク尺度では離散的であるという予測を検証する方法があると指摘した。彼の方法は全宇宙を装置として用いるものだった。

離散的幾何学を通過するとき、光子は古典物理学が予測する経路からは小さなずれをこ

うむる。こうしたずれは光子に結びついた波が量子幾何学の離散的ノードに散乱することで生じる干渉効果によって引き起こされる。われわれの検知できる光子に対して、これらの効果は非常に小さい。しかしながらアメリノ＝カメリア以前にはだれも思いつかなかったのは、光子が非常に長い距離を旅するとき、この効果が積み重なることだった。われわれは観測可能な宇宙の大部分を渡ってきた光子を検知できる。非常に激しい、たとえばX線やガンマ線バーストをつくりだすようなできごとの映像を、衛星で撮って注意深く調べることで、空間の離散的構造を実験的に発見することが可能になるだろう、と彼は提案している。

もし空間がプランク尺度で原子構造をもつことをこれらの実験が示せば、それはたしかに二十一世紀初頭の科学のもっとも興奮すべき発見となるだろう。この新しい方法を発展させることで、今日、原子の配列の画像を研究するように、われわれは空間の離散的構造の画像を眺めることができるだろう。そして、もし前の二つの章で私が述べた研究がまったく無関係でなければ、われわれの見ているのはウィルソンのループおよびポリヤコフのループが、ペンローズのスピンネットワークに組織されたものであろう。

11 空間は弦の音がする

科学をする上でもっともむずかしいのは、ときには一定のレベルの技法と知能が要求されることではない。技法は学べるし、知能についていえば、われわれのうちで、ほんとうに頭がよくて自分ひとりで成功した人などいない。われわれはみな、独立心がもっとも強い人でも、献身的で律儀なので、とにかく仕事が完成するまでやり通す。行き詰まったときは、他人の仕事に抜け道を探してみる。道を見失ったとき、他人が何をしているかを探ってみる。それでもしばしば道を見失う。ときには友人や同僚と群をなして道を見失う。

その結果、科学でいちばんむずかしい場面に出会う。不完全な情報のなかで正しい選択をおこなう能力が要求されるのだ。これには直観や自分自身への信頼とかいった、テストで測れない特性が必要である。アインシュタインはこのことをよく知っていたから、ウィーラーに向かってこう言い、ウィーラーは好んでそれをくり返した。「それがいかに不合理だと言われようと、絶対空間と時間のアイデアに固執したニュートンの勇気と判断力を称賛する」これを見抜いたことがおそらくニュートンの最大の業績だというのである。

アインシュタイン自身は独力で、学界の助けを借りずに偉大なことをなしとげた人物だと言われている。それは驚嘆すべき物語だ。しかし、これは実際に起きたこととはほど遠い。最近、私のパートナーと私は幸運にもベルリンで、歴史家が刊行準備中のアインシュタインのノートブックを見せてもらった。それは一般相対性理論の創造にかかわるページだった。現役の物理学者として、何が起きているかは明白だった。彼は混乱し、迷っていた――すっかり迷っていた。だが彼は同時に非常に優れた物理学者だった（もちろん、真実を直接知覚する神秘的な能力の持ち主という意味ではないが）。ノートブックには優れた物理学者が同じ技法と戦略を駆使しているのが見える。

そこでわれわれは期待をもってページを開く。だが、依然、道は開けない。優れた物理学者は何をしたか。彼は友人と語り合う。突然、一つの名前がページになぐり書きされる。

「グロスマン!!」この友人はアインシュタインに曲率テンソルと呼ばれる何かを教えたようだ。これがアインシュタインの捜し求めていた数学的構造であり、いまでは相対性理論を理解する鍵だと理解されている。

実際には私はアインシュタインが曲率テンソルを自力で考案できなかったことにほっとしている。私が相対性理論を勉強した教科書のなかには、アインシュタインの原理が与えられたなら、有能な学生は曲率テンソルを自分で考案できたはずだ、とほのめかしているものもあった。アインシュタインでも正しい数学を知っていた友人に、答えを聞かなければならなかったのだ。

教科書はつづけてこう言う。いったん曲率テンソルを理解すればアインシュタインの重力論はすぐ理解できると。だが、彼はできただろうか。できないのは明らかだった。有望そうな出だしだったが、彼は過ちを犯した。過ちが過ちでないことを説明するために、彼はうまい論法をひねりだした。われわれは滅入る気持ちで彼のノートブックを読み、その議論は問題についてこう考えてはならないことを述べているのだ、ということを悟る。立派な物理学の学生としてわれわれは、アインシュタインの論法は誤っているだけではなく、馬鹿げていることを知っているが、それを考えだしたのがアインシュタインその人だということをだれも教えてくれなかった。ノートブックの終わりで、彼はその理論の正しさを

みずからに納得させようとするが、そうしたことがらについては彼や当時のだれよりも経験の多いわれわれには、それが数学的に無矛盾でさえないことが見抜ける。だが、彼は自分自身と他の何人かの人に有望だと納得させ、それから二年のあいだ、彼らはこの間違った理論を追求した。実際、われわれの見たノートブックのあるページには、ほとんど偶然に正しい方程式が書き出されていた。しかし、アインシュタインはそうだと認めることができず、間違った試みを二年間くり返した後、やっとそこに戻った。そのときどこで間違ったかを最終的に彼に認めさせたのは、親友からの問いかけだった。

彼のノートブックにはアインシュタインの偉大さを疑わせるものは何もない――その反対だ。彼のノートブックには、混乱の茂みからこの偉大な人間を抜け出させたその勇気と判断力の痕跡がたどれるのである。教訓はこうだ。新しい物理学の法則を創造するのはむずかしい。たしかにむずかしい。それには知能と勤勉以外に、洞察、不屈さ、忍耐と性格の助けが同じように要ることを、アインシュタインはだれよりも知っていた。科学者が共同体をつくって研究しているのはこのためだ。

もう一つの教訓は、アインシュタインが相対性理論をつくり上げる闘いにおいて、なぜそんなに多くの失敗をしたかにかかわる。彼がそれほど苦心して学んだのは、空間と時間は絶対的な意味をもたず、関係のシステム以外の何ものでもないということだ。アインシ

ュタイン自身がどのようにしてこの教訓を学んだか、そしてそうすることで空間と時間が関係的であるというアイデアを他の何にも増してうまく実現する理論をいかにして創造したかは、美しい物語である。しかし、ここはそれを語る場所ではない――それは正しく語れる歴史家のためにとっておこう。

本章の主題はひも理論である。現在の定式化では、ひも理論の主要な間違いは、時空が進化しつつある関係のシステムだという一般相対性理論の基本教訓に敬意を払わない点である。ここまでの章で紹介した用語を用いれば、ひも理論は背景依存であるが、一般相対性理論は背景独立である。それと同時に、ひも理論は最終的な形をとっていそうもない。たとえ、ひも理論が究極的に背景独立な形に再定式化されたとしても、歴史はアインシュタインのニュートンに対する見解がひも理論にもやはりあてはまると記録するだろう。進歩を遂げるために基本原理を無視することが必要ならば、彼らはそうする勇気と判断力をもっている。

ひも理論を語るのは容易ではない。なぜなら今日でも、ひも理論がほんとうは何なのかわかっていないからである。問題はわれわれがまだ、ひも理論を基本理論としてあるべき形で表現していないことだ。紙の上にあるものをそのまま理論と考えるわけにはいかない。われわれがもっているものは理論の解の例の長いリスト以上のものではない。

あるいは、もっと簡単な例を引けば、現在の形のひも理論と究極理論の最終形との関係は、ケプラーの天文学とニュートンの物理学のそれと同じであると言えそうだ。ヨハネス・ケプラーは惑星が楕円軌道を描くことを発見し、この原理と彼の発見した他の二つの規則といっしょにして無数の可能な軌道を描くことができた。しかし、惑星軌道がなぜ楕円であるか、そのわけを発見するにはニュートンが必要だった。その理由を発見することによってニュートンは惑星の運動と他の多数の観測されている運動、たとえばガリレオが発見した地球上で投げられた物体がたどる放物線運動とを結びつけることができたのである。ひも理論の解の実例が最近さらにたくさん発見されているが、基本原理のないままこれらの解を構築するには、技巧は実際貧しい。これらの実例は理論について多くのことを教えてくれるが、これまでのところ少なくとも理論が何であるかを明らかにするには不十分である。解のリストから理論の原理まで飛躍するのに洞察力が必要なのだが、だれもそれをもっていなかったのだ。

では、ひも理論について知っていることからはじめよう。それはこれらがこの理論を真剣に受け止める十分な理由だからだ。量子論ではどの波にも粒子が伴っている。電磁波には光子がある。電子には電子波（確率波）がある。波は基本的なものですらないのである。音叉を叩くとき、それを上下に伝わる波をつくりだす。これらは金属を伝わる音波だ。量

子論はこのような音波にも粒子を結びつける。その粒子はフォノンと呼ばれる。かりに周りの空虚な空間を重力波で掻き乱すとしよう。それには何か質量のあるものを振り回せばよい――私の腕でもよければ、一対の中性子星でもよい。重力波は空虚な空間を背景にして動く小さなさざ波と理解できる。

重力波に結びついた粒子はグラビトンと呼ばれる。だれもまだグラビトンを観測していない。重力波は物質と弱い相互作用しかしないので、検出はかなりむずかしい。しかし量子論を重力波にあてはめるかぎり、グラビトンは存在するはずである。グラビトンが物質と相互作用することはわかっている。どんな重さの物体が振動するときにも、重力波をつくりだすからである。ちょうど光子が光に結びついているように、グラビトンは重力波に結びついていなければならないのだ。

二つのグラビトンはたがいに相互作用しなければならない。それは、グラビトンはおよそエネルギーをもつものなら何ものとでも相互作用し、グラビトンはそれ自身エネルギーを携えているからである。光子の場合と同じく、グラビトンのエネルギーはその振動数に比例するので、グラビトンの振動数が高いほど、より強く他のグラビトンと相互作用する。では二つのグラビトンが衝突したときに、何が起こるか。たがいに散乱し、軌跡を変える。よい量子重力論は二つのグラビトンが衝突したとき何が起こるかを予測できなければなら

ない。それはまた、波がどんなに強くても、そして振動数がいくつであっても、答えを提供できなくてはならない。いかに量子論でアプローチするか、われわれの知っているのがこの種類の問題である。たとえば、光子は電子のようにどんな種類の荷電粒子とも相互作用することを知っている。光子と電子の相互作用についてはよい理論があり、「量子電気力学」、略してQEDと呼ばれている。それは一九四〇年代後期に、リチャード・ファインマン、ジュリアン・シュウィンガー、朝永振一郎らによって発展させられた。QEDは光子と電子その他の荷電粒子の散乱について、小数点以下一一桁の精度で実験と一致する予測をおこなっている。

物理学は他の科学と同じく、可能性の技術である。それはわれわれがQEDをほんとうには理解していないということである。その代わりに、それを理解するためにごまかしをおこなわねばならない。光子と電子が相互作用するときどういうことが起こるかを計算するための手順を、そこから近似的に引き出すのである。この手順を「摂動論」と呼ぶ。

摂動論を説明するのは実際ごくやさしい。ファインマンのお陰で、それを理解するための簡単な図式的な方法がある。過程が起こる世界を図に描こう。そこでは三つのできごとが起こりうる。電子はある時刻に点Aから別の時刻に点Bに動くとする。これを図11-1のように、線として描くことができる。光子もやはり旅することができるが、これは図で

は破線で表す。起こりうる唯一のことは電子と光子の相互作用だが、これは光子の線と電子の線とが出会うところで示される。出会ったところで何が起こるかを計算するには、起こりうることをすべて描きだせばい い。二つの電子が場面に登場するところではじまり、二つの電子が去っていくところで終わるのである。このような過程は無数にあり、図11-2にはそのいくつかだけを示した。ファインマンは一つ一つの図にその過程が起こる確率（実際には、その自乗が確率になる量子振幅）をどう結びつけるかを示してくれた。これで理論のすべての予測が計算できる。

いまでは「ファインマン・ダイヤグラム」という適切な名前で呼ばれているこれらの図形を用いれば、ひも理論がもっと説明しやすくなる。理論の基礎的な前提は、粒子は存在せず、ひもだけが空間を動いているというものである。ひもはちょうど空間に張られたル

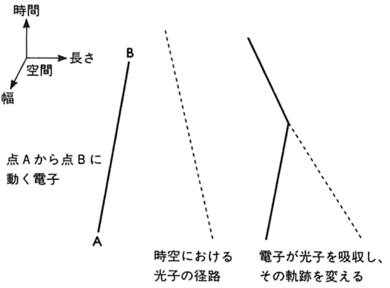
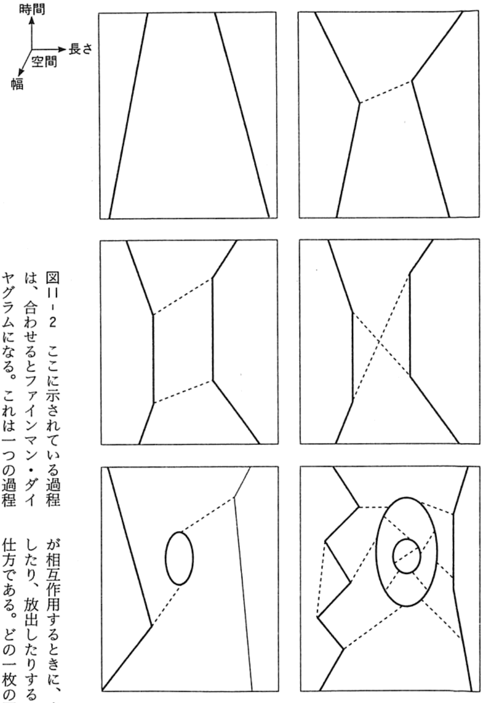


図11-1　電子と光子の理論（量子電気力学、略してQED）における基礎過程。電子と光子は時空を自由に動けるし、あるいはたがいに相互作用する。その際には電子が光子を吸収したり、放出したりする。



図II－2　ここに示されている過程は、合わせるとファインマン・ダイヤグラムになる。これは一つの過程が起こりうる仕方を図にしたものである。ここに示したのは二つの電子が相互作用するときに、光子を吸収したり、放出したりするいくつかの仕方である。どの一枚の図も宇宙の歴史上起こりうる一つの物語なのである。

ープのようなものだ。それが何ものでできているのでもないのは、粒子が点であり他の何ものでもないのと同じだ。ひもはたった一種類しかなく、種類の異なる粒子はこれらのループの異なる振動様式だと想定された。つまり図11-3に示されているように、光子と電子はひもの振動の異なる仕方だと考えられた。ひもが時間のなかを動くときには、それは線というよりもチューブの形をなす（図11-3）。二つのひもが合体して一つになることもあるし（図11-4）、あるいは一つのひもが分裂して二つになることもある。光子と電子の相互作用を含む自然に起こる相互作用はすべて、このような分裂と合併として解釈できる。

　ファインマンの方法の厄介なところは、つねに無限の数式を導くことだ。それはダイヤグラムにループが現れ、そこで粒子が創造され、相互作用し、破壊されるからである。それらはごく短い時間しか存在しない

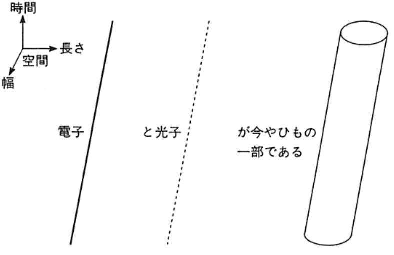
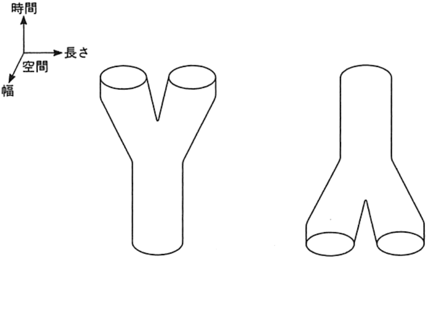


図11-3　ひも理論では動くものは一つしかない。これがひもである。空間に張られたループだ。ひもの異なる振動様式は、異なる種類の素粒子のようにふるまう。

ので、「仮想粒子」と呼ばれている。不確定性原理によれば、エネルギーの保存が短期間だけ宙ぶらりんになっているあいだ、仮想粒子はごく短い時間存在できるからだ。これが大問題を引き起こす。過程が起こる総体的な確率を得るには、すべてのダイヤグラムを合計しなければならないが、もしある粒子がゼロから無限大までのあいだの任意のエネルギーを取りうるとすれば、合計しなければならない可能な過程のリストは無限になる。これは複雑な手順で無限大の数を書き出す数式に通じる。その結果、ファインマンの方法は一見、光子と電子の相互作用という問題にナンセンスな答えを与えるように見える。

たいへん巧妙なことに、ファインマンその他の人たちはこの理論が、「電子の質量はいくらか?」や「その電荷はいくらか?」というような少数の疑問にだけ、馬鹿げた答えを与えることを発見した。理論はこれら

図II-4　粒子間のあらゆる種類の相互作用はひも理論では、ひもの分裂と合併を用いて解釈できる。



が無限大であると予測するのだ！　ファインマンはこれら無限大の答えに出会うたびにそれを消して、正しい有限な答えで置き換えれば、他の問題に対する答えも納得のいくものとなることに気づいた。もし理論を電子の質量と電荷に正しい答えを出せるようにしてやると、あらゆる無限大を表す数式は取り除かれてしまう。この手順を「くりこみ」という。ある理論でこの方法が使えるときには、理論はくりこみ可能であると言われる。量子電気力学の場合、この手順はうまくいく。量子色力学でもうまくいくし、放射性物質の崩壊に関するワインバーグ―サラムの理論にもうまくあてはまる。この手順がうまく働かないときには、その理論はくりこみ不能であるという――この方法は意味のある理論をもたらすのに失敗したのである。大部分の理論の場合には実際、失敗するのである。この方法で成果があがるのはわずかな特殊な場合なのだ。

このやり方で理解できない理論のうち、もっとも重要なのはアインシュタインの重力論である。その理由は、ダイヤグラムのなかを動く粒子に任意の大きさのエネルギーが現れることとかかわる。しかし、アインシュタインによればエネルギーが質量であり、ニュートンによれば重力の引力は質量に働くので、重力の強さはエネルギーに比例する。したがってより大きなエネルギーをもつダイヤグラムは、それに応じて外部に大きな影響を及ぼす。しかしこの理論によれば、ダイヤグラムのなかのエネルギーは任意の大きさを取りう

る。その結果は一種の暴走するフィードバック過程であり、ダイヤグラムの内部で起きていることはすっかり制御を失ってしまう。ファインマン・ダイヤグラムの中の粒子の言葉で、重力理論を記述する術をだれもまだ発見していない。しかし、ひも理論で重力の効果が理解できる。これはその最大の業績だ。古い理論と同じく、多数のひも理論の変種があって、なかにはあらゆる物理過程に対して無限大を導いてしまうものがあるが、これらは捨てざるをえない。残されたのは無限大を全然もたない一群の理論である。

矛盾のないひも理論のリストは非常に長い。一から九にいたる、すべての次元において矛盾のないひも理論がある。九次元で矛盾のないひも理論は五種類ある。われわれの住んでいると思われる三次元世界に下りると、矛盾のないひも理論が少なくとも何十万とある。それらの理論の大部分は自由なパラメーターをもって現れるので、素粒子の質量のようなものには一意的な予測はしない。各々の矛盾のないひも理論は非常に緊密に組み立てられている。異なる種類の粒子はすべて同じ基本的な物体（ひも）の振動で生じるので、どの粒子がどの理論で記述されているか、選ぶ自由は一般的に言ってない。大部分は観測するには大きすぎるエネルギーをもつとはいえ、可能な振動、したがって可能な粒子は無限にある。最低の振動様式だけが観測できる質量をもつ粒子に対応する。注目されるのは、ひもの最低の振動様式に対応する粒子はつねに、われわれの観測する粒子と力の幅広いカテ

ゴリーを含むことである。他の振動様式は陽子の質量の約10^{19}倍の質量の粒子に対応する。これはプランク質量であり、プランク長さの大きさのブラックホールの質量である。

しかしながら、ひも理論がわれわれの宇宙を記述するとしても、どれから取り上げるべきかをめぐって論争がある。多くのひも理論はこれまで見つかっていない粒子の存在を予測している。その多くは空間と時間のなかで重力の強さが変化するのを防ぐ点で難がある。そしてほとんどすべての矛盾のないひも理論は、粒子のあいだに見えるものを越えた対称性を予測している。これらのうちでもっとも重要なのは「超対称性」である。

超対称性は重要なアイデアなので、寄り道して論ずるに値する。素粒子は大きく二つのタイプ、ボソンとフェルミオンに分かれる。ボソンには光子やグラビトンなどが含まれ、角運動量はプランク定数の単位で測れば簡単な整数になる。フェルミオンは電子、クォークやニュートリノなどを含み、角運動量は上の単位で測ると整数の二分の一になる。フェルミオンはまた、二つの同じ粒子が同一の状態を占めることはできないとするパウリの排他原理を満たす。超対称性では同じ質量のフェルミオンとボソンが対をなしているという。だが、自然にはたしかにそのようなものは観測されていない。もしボソン的な電子やクォークといったものが存在すれば、世界はがらりと変わるだろう。パウリの原理は何の力ももたず、どんな形の物質も安定ではないだろうからだ。もし超対称性がわれわれの世界の

真理であれば、世界は「自発的な破れ」を起こすだろう。つまり、その背景場はどの対についても、その一方には大きな質量をもたせ、他方にはそうしないのである。このような奇妙な対称性を考慮する唯一の理由は、すべてでなくても大部分のバージョンのひも理論が矛盾のない答えをもつには、それが必要と思われるからだ。

ひも理論には明らかに非常に不思議なところがある。その長所のなかには、それが自然にすべての粒子と力の統合を導くことと、重力を含む多数の矛盾のないひも理論があるという事実がある。ひも理論はまた、第9章で論じた双対性の仮説を完全に実現している。

だが、これにもかかわらず非常にいらいらさせられる点もある。空間と時間は固定されておらずダイナミカルであり、絶対的ではなく関係的であるという、一般相対性理論から得た教訓を、ひも理論が十分に取り込んでいないように見えることである。ひも理論では、現在の定式化のままでは、ひもは背景となる時空に対して動くのだが、この時空は絶対的で固定されたものだった。空間と時間の幾何学は普通、永久に固定されていると見なされる。あるひもで起きていることはすべて、この固定した背景に対して動き、おたがいに相互作用する。しかしこれは間違いである。というのは、それは空間と時間を固定された不変の背景と考え、それに対して事物が動き、相互作用するというニュートン物理学の誤りをなぞっているからだ。空間と時間をつくりあげている関係の全システムをどれ一つ固定

せずに、単一のダイナミカルな実体として扱うのが正しい。一般相対性理論とループ量子重力論はまさにこのやり方で働いているのである。

ひも理論のもう一つの短所は、それが一つの理論ではなく、一クラスの理論なので、素粒子について多数の予測を導かないことである。この短所は背景依存の問題と密接に関連している。各々のひも理論は異なる背景時空に対して動くので、ひも理論を確定するには空間の次元と時空の幾何学を最初に固定しなければならない。多くの場合、観測される以上の次元がある。これはわれわれの宇宙では余分な次元がきつく巻き上げられていて、直接に知覚できないせいだ。われわれはこのことを余分な六次元が「コンパクト化」されているという。

六つの余分の次元がコンパクト化される仕方は、何十万もある。各々の仕方は六つの余分な次元に対する異なる幾何学とトポロジーに対応する。その結果、世界が三つの大きな空間的次元をもつという基礎的な観測に矛盾しないひも理論が、少なくとも同じ数だけある。その上、これらの理論は各々、コンパクト化された六つの次元の大きさその他の幾何学的な性質を記述する一組のパラメーターをもっている。今度はこれが、われわれの見る三次元の世界の物理学に影響する。たとえば余分な次元の幾何学は、われわれの観測する素粒子の質量と相互作用の強さに影響するのである。

結局、現在の形のひも理論は、統一理論ではあるが、われわれが現実に観測する物理学について予測するところが少ない。新しいもっと強力な粒子加速器が見いだすものについて多数の異なるシナリオは、ひも理論のどれかのバージョンと矛盾しないだろう。つまりひも理論は実験的確認が取れていないばかりか、今後数十年のうちに実験が行われ、確定的に確認あるいは否定されることを想像するのもむずかしい。また、ひも理論の立場からすれば、九つのうち六つの次元をコンパクト化し、他の三つを大きいまま残すのに特に困難はない。九つから〇まで、どれだけの次元が大きいまま残される世界も、ひも理論で容易に記述できるはずだ。

ひも理論はこのようにして、見える世界について、すべての可能な物理現象の貧しい貧弱なサンプリングしか提供しないことを示す。なぜなら、もしひも理論が真実ならば、それは次元の多くと対称性の多くが隠されていることを告げるからだ。しかし、多くの人びとはひもを信じている。これは一つには、現在の定式化がいかに不完全でも、ひも理論は依然として背景依存なレベルで矛盾はないし、重力を他の力とも矛盾なく統一する一つのアプローチにとどまるからだ。

さて、われわれは類推によって次のように論じることができる。アインシュタイン方程式の解である任意の時空を取り上げ、内部の若干の物質を揺らしてみる。これで重力波が

生み出せる。この波は池の表面の波のように、元来の時空上でさざ波のように動く。基本理論の解でも同じようにさざ波をつくることができる。もしこれらが背景上で動く波を生ぜずに、ひもを生じるとしたら？　これは想像するのがむずかしいかもしれないが、双対性の仮説によれば、ひもはたんに電磁場のような場を眺める異なる仕方であることを思い出してほしい。そして、場を揺らせば波が手に入る。電場と磁場の揺れは結局のところ、光以外の何ものでもない。

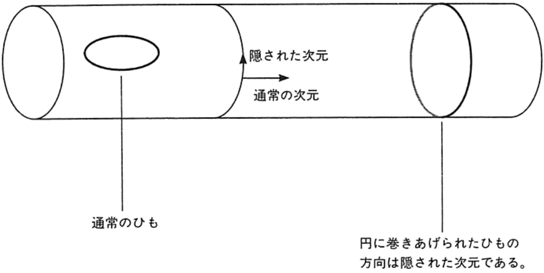
残されたのはこの単一の、統一的なひも理論を構築することである。これは少数の人が懸命に取り組んでいるプロジェクトであり、白状するが私自身が少なからぬ時間を注ぎ込んでいるのがこれなのである。現在のところ、だれもが一致して認めるこの理論の形はないが、少なくとも名前だけはある――われわれが「M理論」と呼ぶのがそれである。Mが何を指すのかだれも知らないが、これまでのところ存在が憶測されているだけの理論には相応しい。

ひも理論家は目下、多大な時間を費やしてM理論が存在する証拠を探している。これまでにじつに上手くいった戦略の一つが、異なるひも理論同士の関係を探すことだった。一見異なるひも理論の二つのバージョンがまったく同じ物理現象を記述していると判明した事例がいくつもあった。（このことはある場合には、直接見られる。その他の場合には、

偶然の一致がある近似か、あるいは余分な対称性を課する簡単な理論のバージョンの研究だけから明らかに見てとれる。）こうした関係は異なるひも理論がより大きな理論の一部であることを示唆している。これらの関係に関する情報から、M理論がもし存在するとすれば、M理論がもつはずの構造についていくらか知ることができる。たとえば、それはM理論がもつ対称性について何らかの情報をもたらす。M理論の対称性は双対性のアイデアを大きく拡張するものであるが、どの単一のひも理論のなかでもうまく拡張できない。

もう一つの非常に重要な問題は、M理論が描く宇宙において、空間と時間は連続的か離散的か、というものである。最初は、ひも理論は連続的世界を提示しているように思われた。というのもその理論は、空間と時間を連続的に動く、ひもという描像にもとづいているからだ。しかしこれは誤解を招きやすい。くわしく見れば、ひも理論は空間が離散的構造をもつ世界を記述しているように見えるからである。

離散性を見る一つの方法として、巻き上げられた空間上でひもを調べることがある。たとえば一次元は円をなす（図11－5）。巻き上げられた円の半径をRとし、もしRをどんどん小さくしていくと、理論は困難に陥ると思われるかもしれない。しかし、ひも理論では、Rが非常に小さくても非常に大きくても、そのことを区別しないという、びっくりするような性質を備えていることが判明している。その結果、Rには最小可能な値がある。



図II-5　円筒は二次元空間で、その一つの方向が円である。ひもが円に巻き上げられているのが見える。これは典型的な余分な次元の隠し方のアイデアである。水平方向は三つの通常の方向の典型であり、垂直方向は隠された次元の一つを代表する。時間はここには示されていない。

もしひも理論が正しければ、宇宙はこの値より小さくなることはないのだ。

これにはかなり簡単な説明があるが、ひも理論の研究では普通、どんな種類の推論が見られるか、せめてその風味くらいは味わってもらおう。なぜRが最小可能な値をもつかは、巻き上げられて円筒になるときにひもには二つの異なることができるという事実とかかわりがある（このことを二つの自由度があるという）。第一に、ひもはギターの弦のように振動できる。円筒の半径が固定されているので、ひもは一連の離散的な様式で振動できる。だが、ひもの自由度はもう一つあって、何回でも円筒のまわりに巻き上げられることができる。こうして円筒の周りに巻き上げられたひもは、二つの数字で特徴づけられる。様式の番号と巻き上げ回数である。

もし円筒の半径Rを減少させようとすれば、ある臨界値以下では、二つの数字はたがいに入れ換わる。三番目の振動様式で半径Rが臨界半径よりも少し小さい円筒を五回巻き上げたひもは、五番目の振動様式で半径が臨界半径よりもわずかだけ大きい円筒を三回巻き上げたひもとは区別がつかない。小さな円筒上のどの振動様式も、大きな円筒を巻き上げた異なる様式と区別がつかない。われわれに区別がつかないのだから、小さな円筒に巻き上げられたひもの様式は不要だ。理論のすべての状態は、臨界値よりも大きい円筒を用いて記述できるのだ。

離散性を見るもう一つの方法は、光速にきわめて近い速さで通りすぎるひもを想像することである。そのひもは一組の離散的な要素を含み、要素の一つ一つが一定の運動量を携えている。これらは「ひもビット」と呼ばれ、図11-6に示されている。ひもの運動量が大きくなればなるほど、ひもが長くなるので、ひもと見比べて知ることができる物体の大きさには限界がある。だが、ひも理論によれば、すべての粒子はそもそも、実際にひもでできているので、もし理論が正しければ、最小の大きさというものがある。ちょうど銀に最小の小片、つまり銀の分子があるのと同じで、伝達できる最小可能な過程があり、それがひもビットだ。

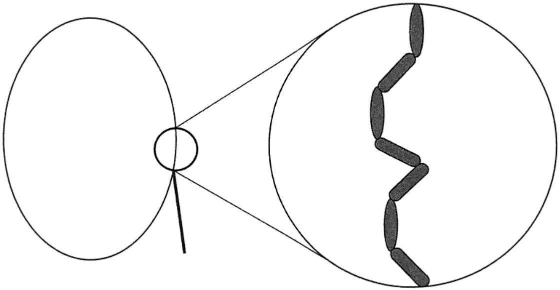
ひも理論で探査できる最小限の大きさがあるという事実を言い表すには、簡単な方法がある。通常、量子論では観測できる限界はハイゼンベルクの不確定性原理を用いてつぎのように表される。

$$\Delta x < (h/\Delta p)$$

ここでΔxは位置の不確定さであり、hは有名なプランク定数、Δpは運動量の不確定さである。ひも理論はこれを次のように修正する。

$$\Delta x < (h/\Delta p) + C\Delta p$$

Cはもう一つの定数であり、プランク尺度とかかわりがある。さて、新しい項がなけれ



図II-6　プランク規模の拡大鏡で見たひもは、木製のへびの玩具のように、離散的なビットからなっているのがわかる。

ば、運動量の不確定さを大きくすることで、位置の不確定さは好きなだけ小さくできる。方程式の新しい項が加わるとそうはできない。運動量の不確定さが十分大きければ、二番目の項が介入し、位置の不確定さは減少するどころか増大しはじめるからだ。位置の不確定さには最小限の値があり、これは物体を空間に位置づける精度には絶対的な限界があることを意味する。

つまり、もしM理論が存在するなら、空間が連続的であるような世界を記述することはできず、またいかに小さな情報であっても無限の量を任意の領域に詰め込むことはできない。これはM理論が異なる概念的な言語で定式化せざるをえず、何であれ、ひも理論の直接的な延長線上にはありえないことを示唆している。だとすれば、ひも理論の現在の定式化は過渡的なものといえそうだ。そこには新しい物理学の要素と、空間と時間が連続的でありも無限に分解可能で絶対的であった、ニュートン的な古い枠組みとが混在しているのであろう。残された問題は、古いものと新しいものを分離し、二十世紀と二十一世紀の実験物理学に支えられた原理だけを用いて、理論を定式化するコヒーレントな方法を見いだすことである。

12 ホログラフィック原理

ループ理論によると面積と体積は量子化され、離散的な単位としてしか現れない。ひも理論は最初、連続的なひもが連続的な空間を動くのを記述しているように見える。しかし、くわしく見ると、ひもは実際には離散的な小片、ひもビットと呼ばれるものでできていて、それぞれが離散的な量の運動量とエネルギーを携えていることがわかる。これは不確定性原理を拡張したものを単純で美しく言い表したもので、そこから最小の可能な長さがあることもわかってくる。

ブラックホールの熱力学はこれ以上に極端な結論、ベッケンスタイン限界を導く。この原理によれば、任意の領域に含まれる情報の量は有限であるばかりではなく、プランク単位で測ったその領域の境界の面積に比例する。これは世界はプランク尺度においては離散的でなければならないことを意味する。世界が連続的であったとすれば、いかなる領域も無限の量の情報を含みうることになるからだ。

三つの異なるアプローチは世界の異なる側面を探究する。たとえ究極の量子重力論があるとしても、異なる物理的領域があって、それぞれの領域で基礎的な原理が違ったものになるだろう。ここで起きているのはまさにこれであるように見える。異なるバージョンの離散性は、異なる質問を発することから生じる。

もし異なるアプローチが統一されるならば、三つのアプローチすべてと矛盾しない仕方で量子幾何学の離散性を表現する原理があるはずである。もしこうした原理が見つかれば、三つを一つの理論に結び合わせるガイドとして役立つだろう。実際、まさにこうした原理が近年提唱されている。それは「ホログラフィック原理」と呼ばれるものだ。

この原理のいくつかの異なるバージョンがさまざまな人たちによって提唱されてきた。過去数年にわたっておびただしい議論がなされたが、ホログラフィック原理が正確に何を意味するかについて一致は得られていない。この分野にいる者は、ホログラフィック原理

のいずれかのバージョンが真実だという強い感触を得ている。そして、もしそれが正しければ、それは量子重力論の文脈でだけ意味をなす最初の原理となるだろう。

ホログラフィック原理は何よりもまず、第8章で論じたベッケンスタイン限界に示唆された。ここにベッケンスタイン限界について述べる一つのやり方がある。どんな物理システムでもいいから考えてみよう。何からできていてもかまわない――それを事物界と呼ぶ。事物界はスクリーンと呼ばれる有限な境界のなかに閉じこめられていることだけが条件だ(図12-1)。われわれの望むどんな種類の放射もスクリーンを通して送れるし、スクリーン上に生じる変化は何でも記録できる。ベッケンスタイン限界によれば、事物界についていかに多くのイエス／ノー質問に、それを取り巻くスクリーンを通して答えられるかには一般的な限度がある。その数はプランク単位でスクリーンの面積の四分の一よりも小さいはずだ。もしわれわれがもっと質問したら？　原理は二つのことのどちらかが起こるはずであると答える。限度を越えて質問した結果、スクリーンの面積が増加する、あるいは限度を越えた分、以前の質問のいくつかへの答えが消えるもしくは無効になる。スクリーンの面積によって定められた限界以上に、事物界について知ることは決してできない。

通常、事物界に符号化して入れる情報の量は、その体積に比例し、それを包む表面の面積に比例するのではない、と予想するのが当然だ。たとえば、事物界がコンピュータのメ

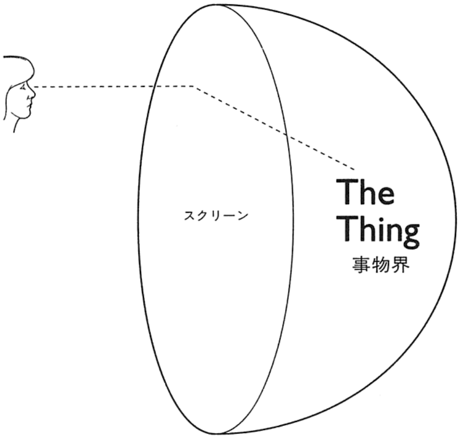


図12－1　ベッケンスタイン限界のための議論。われわれはスクリーンを通して事物界を観測する。それは事物界について受け取ることのできる情報の量を、スクリーン上に表現できる量に制限する。

モリだとしよう。コンピュータを小さくしつづければ、最終的にはコンピュータをもっぱら空間内の量子幾何学から組み立てなければならなくなる——それがなしうることの限界のはずだ。つぎにコンピュータ・メモリを空間の量子幾何学を記述するスピンネットワーク状態だけから組み立てることができる、と想像しよう。異なるスピンネットワーク状態の数は、その状態が記述する世界の体積に比例することが示せる（その理由は、ノード当たりそんな多数の状態があり、体積はノードの数に比例するからだ）。ベッケンスタイン限界はこれに反しないが、外部の観測者が引き出せる情報量はその面積に比例するのであって、体積に比例しないと主張する。そして面積はネットワークのノードの数にではなく、スクリーンを突き抜けて延びるエッジの数に比例する（図12-2）。空間の量子幾何学からつくり上げることのできるもっとも効率的なメモリは、曲面をつくり上げ、一辺が二プランク長さのどの領域にも一ビットのメモリを入れることで達成できる、とわかる。こうしてしまえば、第三の次元にメモリを組み立てることは不要だ。

ベッケンスタイン限界を信じるに足る理由は、少なくともさらに二つある。一つはアインシュタインの理論と境界の関係は逆向きにできることである。本章の終わりにコラムとしてまとめたベッケンスタイン限界のための議論では、境界は部分的にアインシュタインの一般相対性理論の方程式の帰結であると述べた。しかしテッド・ジェイコブソンが名高

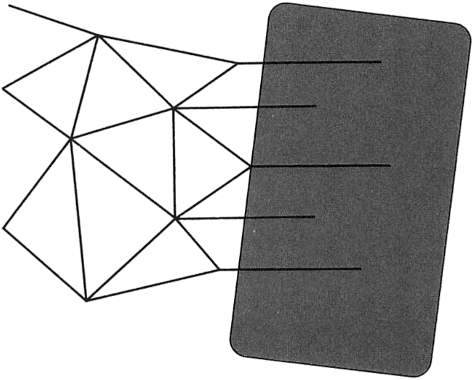


図12-2　空間の量子幾何学を記述するスピンネットワークが、地平線のような境界と有限個数の点で交差する。各々の交差は境界の全面積に追加される。

い論文で示したように、議論を逆向きにして、熱力学の法則とベッケンスタイン境界が真実であると想定してアインシュタインの理論の方程式を導くことができる。熱力学の法則によれば、エントロピーはエネルギーとともに流れなければならないので、エネルギーがスクリーンを通れば、スクリーンの面積も変わらねばならない。その結果、スクリーンの面積を決定する空間の幾何学も、エネルギーの流れに応じて変化しなければならないことになる。ジェイコブソンが示したように、これは実際にはアインシュタインの理論の方程式を意味するのである。

ベッケンスタイン限界を信じるもう一つの理由は、それがループ量子重力論から直に導けることである。そのためには、たんに、スクリーンが量子重力論によっていかに記述されるかという問題を研究すればいい。図12-2に示したように、ループ量子重力論ではスクリーンがスピンネットワークのエッジによって刺し貫かれているだろう。スクリーンと交わる各々のエッジは、スクリーンの全面積に寄与する。加えられる各々のエッジは、スクリーンの量子理論的記述に蓄えられる情報量を増大させる。もっとエッジを付け加えることもできるが、スクリーンが蓄えることのできる情報がその面積より速く増大することはない。これがベッケンスタイン限界の要請していることなのだ。

ベッケンスタイン限界の革新的な意義をはじめて理解したのは、たぶんルイス・クレイ

ンだっただろう。そこから彼は、量子宇宙論とは、外部の観測者に宇宙がどう見えるかという理論ではなく、宇宙の部分をなすシステム間でなされる情報交換の理論であることを導いた。これは後にカルロ・ロヴェリ、フォティニ・マルコプールー＝カラマラと私自身が発展することになる、量子宇宙論の関係的理論に向かう第一歩だった。のちにゲラルト・トフーフトが、私が先に述べた筋にそって、ブラックホールの地平線をコンピュータに似たものと考えはじめた。彼はホログラフィック原理の最初のバージョンを提唱し、その名前を与えた。その後、レナード・サスキンドが速やかにこれを擁護し、ひも理論にどう適用できるかを示した。それ以来、少なくともこの他に二つのバージョンのホログラフィック原理が提案されている。これまでのところ、どれが正しいかについては見解の一致は見られない。私は二つのバージョンについて説明するが、それぞれ強いおよび弱いホログラフィック原理と呼ぼう。

強いホログラフィック原理のアイデアは非常に単純である。観測者はスクリーンを通して観測することで事物界を吟味するよう制約されている。したがって、もし事物界の代わりに、スクリーン上で定義される物理システムがあると想像すれば、観測されたものすべては説明がつく（図12-3）。このシステムはスクリーンだけを含む理論によって記述されるだろう。この「スクリーン説」ではスクリーンを、各辺が二プランク長さの画素一つ

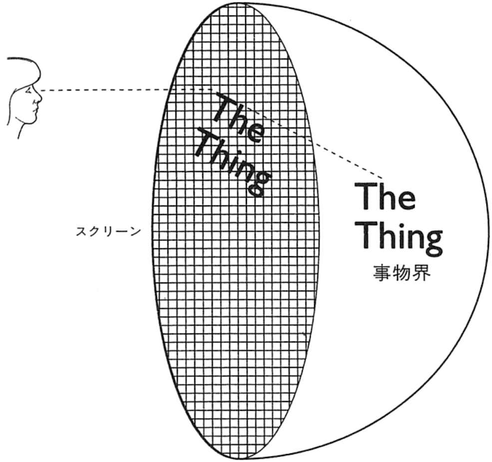


図12-3　スクリーンは、画素が各辺二プランク長さのテレビ受像機に似ている。人は世界についてスクリーン上に表れる情報以上のものを見ることはできない。

ごとに一ビットの記憶容量をもつ量子コンピュータのようなものとして記述する。さて、観測者がスクリーンを通してある信号を送り、それが事物界と相互作用すると想定しよう。結果はスクリーンを通って出てくる信号である。観測者に関するかぎり、仮に光がスクリーン上で量子コンピュータと相互作用し、適切な信号を返したとしても同じことだろう。重要なのはこうだ。観測者には彼らが相互作用しているのが事物界そのものか、それとも単に、スクリーン説の一つの状態として表現された映像なのか、区別することはできない。もしスクリーン説が適当に選ばれるか、あるいはスクリーン上の情報を表すコンピュータが適当にプログラムされれば、スクリーン内部で保たれている物理法則はスクリーンの観測者に対する応答によっても、同じようにうまく表せるかもしれない。

この形では、ホログラフィック原理はつぎのように述べる。任意の表面の向こう側にある世界の部分について与えることのできるもっとも簡潔な記述は、実際には、その表面上にそのイメージがどう展開するかという記述である。これは奇怪に聞こえるだろうが、重要なのはベッケンスタイン限界を基にするそのやり方だ。スクリーン記述が適切であるのは、事物界について、スクリーンの画素の状態によって表現できる以上に多くの情報は得られないからである。強い形のホログラフィック原理は、自然のいかなる物体の物理的記述も、それを取り巻く表面に存在していると想像された、このようなコンピュータの状態

によって同じくよく表現できるように世界はなっている、と述べる。つまり、スクリーンの内部で成り立っているどの法則の組にとっても、スクリーン説を表現するコンピュータをプログラムして、これらの法則のすべての真実な予測を再現させる方法がある。

これは奇怪至極だが、そう思うほど奇怪ではない。問題はそれが事物を用いて世界を記述することである。だが、第4章で論じたように、基本理論にとりくむと、そこには事物はなくただ過程しかない、ということを思い出そう。もしこれを信じるならば、世界を事物によって表現するいかなる原理も信じてはならない。われわれは原理を定式化し直して、過程だけに言及するようにしなければならない。弱い形のホログラフィック原理が述べているのがまさにこれだ。世界が空間の領域を占めている事物界からできていると考えるのは間違いである。そうではなく、世界に存在するものはすべてスクリーンであり、スクリーンの上に世界は表現されているのだ。つまりそれは、二つの事物、かさばるものと、その表面にあるそれらのイメージもしくは表現がある、と断定しているのではない。ただ一種類の事物しかないと断定しているのである——それは表現だ。その表現を通して、われわれは宇宙の歴史における一連のできごとを目にし、世界の他の部分についての情報を受け取る。

このような世界には、情報が世界のある部分から他の部分に運ばれるような過程の他に

は何も存在しない。そして、スクリーンの面積――実は空間の任意の曲面の面積――は、実際、情報のチャンネルとしての曲面の能力以外の何ものでもない。したがって、弱いホログラフィック原理によれば、空間はある観測者から別の観測者に情報を渡すための異なる交信チャンネルすべてについて語る一つの方法にすぎない。そして、面積と体積で測った幾何学は、これらのスクリーンが情報を伝える能力の目安以外の何ものでもない。

このもっと過激なバージョンのホログラフィック原理は、第2章および第3章で紹介したアイデアにもとづいている。それは宇宙はその外部に何らかの形で存在している観測者の見地からは記述できないというアイデアに強く依存している。その代わりに、多数の部分的な見地があり、それらの過去から観測者は情報を受け取ることができる。ホログラフィック原理にしたがえば、曲面の面積のような幾何学的量の起源は、宇宙の内部の観測者に流れる情報を測ることにあった。

こうして、世界はホログラムと言うだけでは不十分である。世界はホログラムのネットワークである。各々のホログラムは他のホログラムとの関係についての情報を符号化して含んでいる。要するに、ホログラフィック原理は世界は関係のネットワークであるという概念の究極的な実現なのである。それらの関係は情報以外の何ものも含まないこの新しい原理によって明らかにされる。このネットワークにおけるどの要素も、他の要素のあいだ

の関係の部分的な実現以外の何ものでもない。つまるところ、宇宙の歴史はたぶん情報の流れ以外の何ものでもないのだろう。

ホログラフィック原理は依然、新しく論争に満ちたアイデアである。だが、量子重力論の歴史上はじめて、最初はクレージーすぎて真実とは思えないが、それを反証しようとするあらゆる試みに耐えて生き抜くアイデアを手にした。どのバージョンが最終的に真だと判明するかはわからないが、量子重力論についてこれまで理解したことが要求しているのはそのようなアイデアのように見える。だが、それはまた、それなしでもやれた以前のどの理論に戻ることもまったく不可能になる類のアイデアだ。量子論の不確定性原理とアインシュタインの等価原理もまたこのタイプのアイデアである。この二つの原理もそれ以前の古い理論の原理に矛盾し、最初はほとんど意味をなさないように見えた。それらと同じく、ホログラフィック原理は、新しい宇宙へのコーナーを回ろうとするとき、人が役立たせようと望む類のアイデアなのだ。

コラム――ベッケンスタイン限界のための議論

事物界が十分大きくて、正確な量子記述でも、平均的な巨視的な記述でも記述できると想定しよう。われわれは帰謬法によって論じることにするが、それにはまず最初に、証明したいこととは反対のことを想定する。したがって、事物界を記述するのに要求される情報量がスクリーンの面積よりもずっと大きいと仮定しよう。簡単にするために、スクリーンは球形と仮定する。

事物界がブラックホールでないことをわれわれは知っている。なぜなら、スクリーンに収められるどのブラックホールのエントロピーも、スクリーンより小さな面積に等しいことを知っているからである。しかし、この場合には、プランク単位でそのエントロピーがスクリーンの面積よりも小さくなければならない。もし、ブラックホールのエントロピーがその可能な量子状態の数であると仮定すれば、これは事物界に含まれる情報よりもずっと小さい。

したがって、（古典的一般相対性理論のある定理から）スクリーンにちょうど納まるブラックホールよりも、小さいエネルギーを事物界はもっていることになる。さて、われわれはスクリーンを通してゆっくりとエネルギーを事物界に流し加えることができる。大量のエネルギーを与え、ある時点まで到達すると、同じ定理によって、事物界は崩壊してブラックホールにならなければならない。だが、一方、ブラックホールのエントロピーはスクリーンの面積の四分の一にあたることも知っている。これは事物界が最初にもっていたエントロピーよりも小さいので、われわれは何とかシステムのエントロピーを下げようと努めてきた。これは熱力学の第二法則と矛盾する。

われわれはエネルギーをゆっくり流し込んでいって、スクリーンの外部ではどこかよそでエントロピーを大きく増やすことができ、驚くことが何も起こらないことを保証することができる。この議論には抜け穴はなさそうである。したがって、もし熱力学の第二法則を信じるならば、スクリーンの外部にいるわれわれが事物界に帰するエントロピーは、たかだかスクリーンの面積の四分の一と信じなければならない。エントロピーはイエス／ノー質問の答えの数だから、これはわれわれが述べたとおりに、ベッケンスタイン限界を意味する。

13 いかにひもを組み立てるか

物理学者のなかにループ量子重力論に大して興奮しない者がいるのはなぜか。その主な理由はおそらく、空間の幾何学がプランク尺度でどう見えるかをうまく説明してはいるが、基本的にかなり退屈だからだ。新しい原理は含まれていない。このアプローチの主な強さ、その単純さと透明さは、おそらくまたその主な弱さなのだ。

ひも理論はちょうどその反対だ。それは基本原理からではなく、量子重力論についてもっとも確かだと感じられること——すなわち、背景独立であることとは矛盾するところか

ら出発する。われわれはこれを無視して、空虚な空間の背景に対して動いているグラビトンその他の粒子の理論を探す。そして試行錯誤によってそれを見いだす。指導原理はうまくいくものを見つけることである。そのために一度ならず何度も規則を変えざるをえない。粒子はなく、ひもがある。三次元ではなく、九次元の空間だ。余分な対称性がある。ひも理論は独自だ。実際には、それはかならずしも独自とは言えず、さまざまなバージョンとして現れる。ほんとうは単にひもがあるのではなく、多数の異なる次元のメンブレンがあるだとか、九つの次元があるのではなく、十次元である、等々。ひも理論は一つまた一つ、驚きの連続だった。原則は取り入れない――入れるのは意味のある重力論に対する希望である。そして予想外の事実が連なる長いリストを手に入れる。探究すべき新しい世界全体だ。

一九八四年から一九九六年まで一〇年以上にわたって、二つの量子重力論があり、それぞれ異なるグループによって完全に独立に発展させられた。各々のグループは自分たちの理論のために設けた問題をうまく解いた。ループ陣営はひも陣営にこう言った。「あなた方の理論は背景独立じゃないから、ほんとうの空間と時間の量子重力論ではない。われわれだけがうまくいく背景独立な理論のつくり方を知っているのだ」一方、ひも陣営もループ陣営に向かって言った。「あんたたちにはグラビトンとその他の粒子の相互作用につい

て矛盾のない記述なんかできやしない。僕たちだけが、重力とその他の相互作用を矛盾なく統合して記述できるんだ」この全期間を通じて、たとえば両方の理論の立場で研究しようとするものは、ただの一人もいなかった。

その結果多くの誤解が生じた。私は、一方の陣営の人の隣に座って、もう一方の陣営の人が発表するのを聞いた経験が一度ならずある。私の隣の人は非常にいらいらしていた。「あの若僧め、何という生意気なやつだ。あらゆる問題を解いた気でいる！」実際には話し手は話し方に気を配り、委細を尽くしてあらゆる留保をつけ、彼らがした以上のことは話さなかった。問題はこのような説明の仕方はその理論に特有な用語を用いておこなわなければならず、私の隣にいた反対陣営の人には全然理解することができなかったことだ。両陣営のどちらにもそういうことがあった。いまでも、会議ではひも理論とループ量子重力論が同じ時間に別の部屋で会合を開いている。がんばって両方の部屋に顔を出した少数の者しか、同じ問題が二つの会合で話しあわれているという事実に気づかない。

しかし、これは科学の問題ではなく、学界の社会学の問題である。ときには、ループの部屋とひもの部屋のあいだを行き来しながら、十七世紀の物理学が今日の科学と同じ社会学的文脈に置かれたら何が起きただろうか、と不思議に思うことがある。そこで、その時代に戻り、科学の代替歴史を考えよう。一六三〇年ごろには、自然哲学の二つの大きな学

派がアリストテレス科学の後継者をめぐって競争していた。会議では、今日と同じようにほとんど重なり合わない二つの平行な会合に分かれた。一方の部屋には、落下する物体の問題が新しい物理学の鍵を握っていると考える人びとがいた。彼らは地球上の物体の運動について深遠な考察に時間を費やした。彼らは放物体を打ち上げ、振り子の実験をし、斜面で玉を転がした。だれもが銘々に落体の理論のパーソナル版をもっていたが、ガリレオが発見した、物体は一定の加速度で落下するという深い原理を取り込まない理論は決して成功しないという確信で統一されていた。彼らは惑星の運動には無頓着であった。というのは、惑星が円軌道を描くという、古い深遠な美しいアイデアに一致しないものを何ら見いだせなかったからである。

その二階上の大きな部屋では楕円理論家が会合していた。彼らは現実の太陽系でも、想像上のさまざまな次元の世界でも、惑星軌道の研究に時間を割いた。彼らにとって、鍵となる原理は惑星が楕円軌道を回るという偉大な発見であった。そして地球上で物体がどう落下するかについては無頓着であった。というのは、多数の物体が中心を目指して押し合いへし合いをしているような地上の複雑さに汚染されない天上においてだけ、真の対称性を世界の背後に見ることができるという点で彼らの見解が一致していたからである。いずれにせよ、すべての運動は地球上のそれを含めて、楕円の複雑な組み合わせに帰着すると、

彼らは最後には確信していた。それに疑いをはさむ者たちに対しては、まだこうした問題を研究するときではないが、その時が来たら、落体を楕円理論の言葉で説明するのに何の問題もないと請け合う。

その代わりに、彼らは最近発見された惑星Dに注目している。これは楕円より放物線にしたがうことが見いだされたのだった。そこで楕円理論の定義は、放物線や双曲線のような曲線を含めるように拡張される。すべての異なる軌道は、C理論と呼ばれる一つの共通の理論の下に統合されるという憶測さえなされる。しかしながら、C理論についての一連の原理として同意できるものはなく、その主題に関する研究の大部分は、大多数の物理学者がついていけない新しい数学を要求するものだった。

とかくするあいだに新しいもう一つの形態の数学が、パリの優れた数学者にして哲学者であるルネ・デカルトによって創始された。彼は第三の理論を提唱した。それによれば惑星の軌道は渦と関係があるのだ。

以上の話は想像上の話だが、ガリレオとケプラーのような偉大なる科学者に実際に起きたことであり、彼らはたがいに相手の発見をほとんど知らず一見関心がないようだったのにもかかわらず、科学革命に本質的な貢献をなしとげたのである。

現在ははるかに多くの人が仕事を分け合っている。しかしながらいまでは、若い人たち

が先輩たちの打ち立てた境界線を越えて彷徨っても、キャリアを危険にさらす恐れがないことを保証するという問題がある。これが重要な論点ではないとするのは無邪気にすぎる。科学の多くの領域で、われわれは新領域の探究よりも焦点を狭くする方が報いられるというアカデミックシステムの償いをさせられている。これはよい科学は聡明さの問題であるのと同じくらい、判断力と性格の問題であり、そしてつねにそうだ、という事実を強調するものだ。

たしかに、ひも理論家とループ量子重力論の人たちを隔てていた相互の無知と自己満足は、ここ五年くらいのあいだに消散しはじめた。その理由は、各々のグループが自分たちの理論では解けない問題を抱えていることに、ますますはっきり気づくようになったからである。ひも理論の場合、それは背景独立な理論をつくるという問題であり、M理論が実際に何かを見いだすという問題である。これは、異なるひも理論を単一の理論に統一するためにも、ひも理論を真に量子重力論にするためにも必要なことだ。ループ量子重力論は、スピンネットワークによる量子時空を古典的な大きな宇宙にまで拡げたときに、通常の幾何学とアインシュタインの一般相対性理論による宇宙像と十分に近いものになるかどうか、という問題に直面する。この問題が持ち上がったのは一九九五年、ドイツの若い物理学者で当時ハーバードで研究していたトーマス・ティーマンが、そのころ存在していた問題を

完全に解くループ量子重力論の定式化を最初におこなったときだった。ティーマンはそれ以前のすべての研究にもとづいており、それに彼自身のいくつかの輝かしい創意を付け加えたのだった。その結果は、原理的にはどの問題にも答えられるはずの完全な理論だった。さらに、その理論は、しっかり定義された数学的に厳格な手順にしたがって、アインシュタインの一般相対性理論から直に導くことができた。

この種類の問題はわれわれには新しいものだが、物質材料を研究する物理学者にはごく身近なものだ。私が手を合わせてコップの形をつくりそれで流水をくむと、「コップ」をちょうど満たすだけの水しか運べない。しかし、氷のブロックなら二辺をつかむだけで持ち上げることができる。

ループ量子重力論はいかにして背景独立な空間と時間の量子論をつくるかを説明してくれる。それはM理論家にひも理論を背景独立にする道を探すための多数の見方を提供する。他方、もしわれわれがひも理論はループ量子重力論の用意する空間と時間の記述から導かれなければならないと信じるならば、古典時空を記述できるようにループ理論をいかに定式化するかについて多くの情報が得られる。ループ理論は、グラビトンが自分ひとりではなく、ひものようにふるまう広がりのある物体の励起の様式として現れるような形で定式化されなければならない。

そうすれば次の仮説を受け入れることが可能になる——ひも理論とループ量子重力論は単一の理論のそれぞれの部分である。この新しい理論は、ニュートン力学がガリレオの落体の理論とケプラーの惑星軌道の理論に対してもっていたのと同じ関係を、既存の理論に対してもっている。各々が限られた領域で起きていることのよい近似であるという意味で、各々は正しい。各々は問題の一部を解いた。だが、また各々には限界があり、それが自然の完全理論のための基礎を形づくるのを妨げている。現在の証拠のもとでは、これが量子重力論を完成する仕方としてもっともありそうなものだと私は信じる。

ループ量子重力論とひも理論はどちらもおよそプランク長さという非常に小さな尺度で物理学を記述する。しかし、ひもの大きさを定める尺度は正確にプランク長さと対応はしない。その尺度はひもの長さと呼ばれる。プランク長さとひもの長さとの比はひも理論ではたいへん大きな意味をもっている。それはある種の荷量であり、ひもがどんな強さで相互作用するかを教えてくれる。ひもの尺度がプランク長さよりもずっと大きいときには、この荷量は小さく、ひもはたがいにあまり強く相互作用しない。

そこでどの尺度が大きいかと尋ねることができる。少なくともわれわれの宇宙では、ひもの尺度がプランク尺度よりも大きいという証拠がある。それらの比が電荷の基本的単位を決定しており、小さな数であるからだ。とすれば、ループがもっと基本的であるシナリ

オを思い描くことができる。ひもはスピンネットワークを伝わる小さな波動あるいは攪乱を表すものであると考えられる。ひもの尺度がプランク長さより大きいので、必要な背景はループのネットワークによって供給されるとして、ひも理論が固定した背景に依存しているという事実を説明できる。ひもが背景を連続的な空間として経験するという事実は、それが滑らかな背景とループのネットワークが区別できるほどの距離まで深く探れないかということで説明がつく（222ページの図11-6を参照）。

では、ひもを大きなループがつくっている一種の編み物の飾りだと想像しよう。ミクロの視点に立てば、ひもは編み物のなかでいかにループが結び目をつくっているかによって記述できる。しかし、大きな尺度では、ひもをつくっているループしか目に入らないだろう。もし空間をつくっている微妙な編み物が見えなければ、ひもは見た目には滑らかな空間という背景に対して見えることになる。こうして、背景空間に対するひもという描像がループ量子重力論から現れてくる。

もしこれが正しければ、ひも理論はスピンネットワークで記述されるもっと基本的な理論の近似であることが判明する。現在、まさにこのアイデアを用いて、ひも理論とループ量子重力論を統一する研究プログラムが進行中である。ごく最近、このプログラムから、ひも理論とループ量子重力論の一形態を含むような新しい理論を発見したとの報告があっ

い。

た。これを有望と見る人もいるが、進行中の仕事なので、私としてはここでは何も言えな

しかしながら、研究が順調に進めば、それは私が第9章で論じた双対性のアイデアをそっくり実現するだろう。また、アミタバ・センの目的も実現するだろう。ループ・アプローチ全体は、いかに超重力を量子化するかを理解しようというこのセンの努力から生まれたのであるが、それはいまやひも理論と密接に関連していることが理解されているからだ。

私の仮説はたしかにまだ証明されていないが、ひも理論とループ量子重力論が同じ世界を記述していることを示す証拠は積み重ねられている。その一例が「非可換幾何学」と呼ばれる構造だ。これは量子論と相対性理論をどう結合するかに関する一つのアイデアで、フランスの数学者アラン・コンヌが創始したものである。基礎的な考え方は非常に簡単だ。量子物理学では一つの粒子の位置と速度を同時に測ることはできない。しかし、もし欲すれば、少なくとも位置だけを正確に決めることができる。だが、位置を決めることは実際には、三つの異なる測定を含んでいることに注意しなければならない。というのは、粒子が三次元の三本の軸に対してどこにあるかを測定しなければならないからである（三つの測定は「位置ベクトル」の三つの成分を生じる）。だから、不確定性原理を拡張して考えると、三つの成分のなかの一つだけをいずれかの時間に測ることができる。同時に二つの

量を測ることが不可能なときには、それらは可換でないと言われるが、このアイデアは非可換と名づけられる新しい種類の幾何学を導く。このような世界では、何か正確に所在が決まっている点というアイデアすら定義することができない。

アラン・コンヌの非可換幾何学は、通常の空間の概念が破綻した世界を記述するもう一つの方法を与えてくれる。そこには点は存在しない。したがって与えられた領域に無限個の点が存在するか、との問いは意味をなさない。とはいえ、ほんとうに不思議なのは、相対性理論、量子論と素粒子物理学の大きな部分が、このような世界に持ち越されることをコンヌが発見したことだった。

最初、コンヌのアイデアは他のアプローチと無関係に発展させられた。しかし、ここ数年のあいだに、人々はループ量子重力論とひも理論のどちらも、幾何学が非可換である世界を記述していることを発見して驚かされた。これが二つの理論を比較する新しい言語を与えるのである。

ひもとループが同じ物理学を記述する異なる方法であるという仮説を検証する一つの方法は、二つの方法で一つの問題を解いてみることである。ひも理論とループ量子重力論のどちらも量子ブラックホールを研究するのに用いられ、ここ数年でどちらの側でもめざましい結果が得られている。

気体が、原子の運動に言及しなくても、密度と温度のような連続的な量を用いて大雑把に記述されるように、アインシュタインの理論では、プランク尺度で存在するかもしれない離散的、原子的な構造に触れることなしに、空間と時間は連続的であると記述される。

この一般的な描像が与えられれば、ブラックホールのエントロピーが、ブラックホールを取り囲む空間と時間の幾何学の厳密な量子記述から得られる、失われた情報の目安かどうかと問うのは当然であろう。ブラックホールのエントロピーがその地平線の面積に比例するという事実は、エントロピーの意味を解明する大きな手掛かりになるはずだ。ひも理論とループ量子重力論はそれぞれこの手掛かりを用いて、量子ブラックホールの記述をつくり上げる方法を見いだした。

ひも理論では、ブラックホールのエントロピーによって測られる失われた情報は、ブラックホールがいかに形成されたかの記述であるという推測によってすばらしい進歩をしるした。ブラックホールは非常に単純な物体である。外部からは質量、電荷それに角運動量といったいくつかの性質しか測れない。これはブラックホールの形成にはさまざまな方法があるということだ。たとえば、崩壊する星から、あるいは一山のSF雑誌を巨大な密度に圧縮することによって――少なくとも理論上は――つくれる。いったんブラックホールがつくられると、内部をのぞきこんで、どのようにつくられたかを知る術はない。放射を

放つが、放射は完全にランダムであって、ブラックホールの起源に関する手掛かりを与えてはくれない。

ここ数年のうちに、ひも理論家はひも理論はたんにひもに関する一つの理論ではないことを発見した。彼らは、量子重力の世界は、いくつもの次元に拡がっている点でひもの高次元のバージョンとでもいうべき、新しい種類の物体で満ちているに相違ないことを発見した。次元にかかわらずこれらの物体は「ブレン」と呼ばれる。これは二次元の物体に使われる「メンブレン（膜）」を縮めたものである。

ひも理論家はある特別な場合には、ブラックホールはこれらのブレンの集まりをひとまとめにすることによってつくれることを見いだした。そのために彼らは、重力が調整可能であるというひも理論の特性を利用する。重力はある物理的な場の値で与えられる。この場が増大するか減少するとき、重力はより強くあるいはより弱くなる。この場の値を調整することで、重力をつけたり消したりすることが可能になる。ブラックホールをつくるために、重力場を消すことからまずはじめた。つづいて、つくろうとしているブラックホールの質量と電荷をもつ、ブレンを寄せ集めることを想像する。その物体はまだブラックホールではないが、重力の強さを上げていけばブラックホールに変えることができる。こうしてブラックホールが形成されるはずだ。

ひも理論家はまだ、ブラックホールをつくる過程を詳細にモデル化するにはいたっていない。また、その結果生じるブラックホールの量子幾何学を研究することもできない。だが、気の利いたことをしてブラックホールが形成される方法の数を数えることができる。ついで、できあがったブラックホールのエントロピーをこの数の目安と仮定する。これを数えれば、ブラックホールのエントロピーとして寸分違わぬ正しい答えが得られる。

これまでのところ、この方法で研究できたのは非常に特殊なブラックホールだけだ。これらは電荷が質量に等しいブラックホールである。つまり、二つのブラックホールの電気的斥力が正確に重力の引力と釣り合っているのである。その結果、この二つのブラックホールを並べて置いても動かない。それらのあいだには差し引き力が働かないからだ。こうしたブラックホールは非常に特殊である。なぜなら、電荷が質量と釣り合っているという条件に強く縛られているからである。そのおかげで正確な結果を得ることができ、それによって結果は非常に印象的である。その一方で、この方法をすべてのブラックホールに拡張するのにはどうしたらよいのかわからない。実際には、ひも理論家は少しだけましなことができる。というのは、この方法は電荷が質量に非常に近いブラックホールの研究に使えるからである。これらの計算もやはり非常に印象的な結果をもたらす。とりわけ、これらのブラックホールによって放出された放射に対する公式の最後の因子2とπまでも再現

するのだ。

ブラックホールのエントロピーに関する二番目のアイデアは、それが勘定であることだ。それもブラックホールをつくる仕方のではなく、地平線そのものの正確な記述に存在する情報をカウントしたものなのだ。エントロピーは地平線の面積に比例するという事実がこのことを示唆している。

この研究は一九九五年にクレイン、トフーフトおよびサスキンドのアイデアに刺激されて、私が量子重力論でホログラフィック原理を検証しようとしたときにはじまった。ベッケンスタイン境界がつねに満たされるので、境界上で幾何学に符号化されている情報はつねに全面積に一定数を乗じたものよりも小さい、というのが結果である。

そのあいだに、カルロ・ロヴェリはブラックホールの地平線の幾何学の大雑把な描像を発展させていた。われわれの研究室の大学院生キリル・クラスノフが、私の発見した方法を用いてカルロのアイデアをもっと精密にできることを示した。そんなことは不可能だと決め込んでいた私はすっかりびっくりした。キリルは私の心配をよそに、ブラックホールの地平線の見事な記述をおこない、そのエントロピーと温度の両者を説明した（だいぶ後になってから、ポーランドの物理学者イェジ・レワンドフスキーがループ量子重力論の理解をずっと深めて、不確定性原理がこの場合いかに回避されるかを示したのである）。

キリルの研究はすばらしいものだったが、多少粗っぽかった。彼はその後、アブヘイ・アシュテカー、ジョン・バエズ、アレジャンドロ・コリチその他、数学的関心の高い人たちの参加を得て、非常に広範な応用がきき、プランク尺度で探ってみると地平線がどう見えるかについて、一般性のある完全にくわしい記述をもたらしたのである。

この研究はひも理論で扱えるよりもはるかに大きなクラスのブラックホールに応用できるが、ひも理論に比べたとき一つ短所がある。エントロピーと温度に正しい値を取らせるには定数を一つ調整しなければならないのである。この定数は大きな尺度で測ったニュートンの重力定数を決定する。プランク尺度で測った値と大きな距離で測った値を比べたとき、定数の値には小さな変化があることが判明する。これは驚くには当たらない。もし原子構造の効果を考慮に入れれば、この程度のずれは固体物理学では普通に起こる。このずれは有限であり、理論全体のために一度、求めておかねばならない（それは実際には、$\sqrt{3}/\log 2$ に等しい）。いったんそうしてしまえば、それはすべての種類のブラックホールに対して、第6章から第8章にかけて論じたベッケンスタインとホーキングの予測とぴったり合致する結果をもたらす。

以上がミクロ的見地からブラックホールについて理解できたところのおおよそである。多くのことがわかったが、いくつかの非常に重要なことが未解決のまま残されていること

は言わないわけにはいかない。これらのうちでもっとも重要なのは、ブラックホールの内部に関することだ。量子重力論もブラックホールの内部の、物質の密度と重力場の強さが無限大になる特異点領域について何か言うことがあるはずだ。量子効果が特異点を取り除くかもしれない、また、その結果として地平線の内部における新しい宇宙が誕生するかもしれない、といった推測がある。

一九九五年まで、どんな量子重力論へのアプローチもブラックホールをいくらかでも詳細に記述できなかった。だれもブラックホールのエントロピーの意味を説明したり、あるいはプランク尺度で探査したときのブラックホールがどんな様子か教えてはくれなかった。さて、少なくともいくつかの場合に、こうしたことがすべてできる二つのアプローチがある。どちらの理論によるにせよ、ブラックホールについて何かを計算できるときには、その計算結果は正しいとわかる。

ガリレオの放物体やケプラーの惑星と同じように、われわれが異なる窓を通して同じ世界を垣間見ているという証拠はますます積み重なっている。ガリレオの研究とケプラーの研究の関係を見いだすには、ガリレオはただ、ボールを十分遠く、十分速く投げて月にすることを想像すればいい。ケプラーは彼の立場から、太陽の非常に近くを回る惑星が、太陽に住んでいる人にはどう見えるか、想像するだけでいい。いまの場合、われわれはひも

がループのネットワークから編み上げられるか否か、あるいはひもに十分近づいて見れば、ループの離散構造が見えるか否か、と問えばいい。最終的には、ループ量子重力論とひも理論は単一理論の二つの部分と見えることに、私は個人的にはほとんど疑いをもっていない。理論を見つけるのに新たなるニュートンが必要かどうか、それともわれわれ死すべき者にもできることなのかどうかは、時間だけが答えるだろう。

14 何が自然法則を選ぶのか

一九七〇年代に遡るが、当時は物理学の終焉については単純な夢があった。量子論、相対性理論、それに既知のさまざまな粒子と力を取り入れた、統一理論が発見されるだろう、というものだ。これは万物の理論であるばかりでなく、唯一無二なものになるはずだ。唯一の数学的に矛盾のない量子論があり、素粒子物理学が重力と統合していることを発見するだろう。正しい理論は一つしか存在せず、われわれはそれを発見したのではなかろうか。それが唯一無二であるために、この理論は自由なパラメーターをもたない――調整可能な

質量あるいは電荷はない。もし何か調整すべきものがあれば、理論にはいく通りかのバージョンがあることになり、唯一無二ではなくなる。ただ一つの尺度があり、その尺度ですべてが測られる。それがプランク尺度である。その理論によってどの実験についても、望みの精度で結果を計算することが可能になる。われわれは電子、陽子、中性子、ニュートリノ、その他すべての粒子の質量を計算し、計算結果は実験結果と正確に一致するだろう。

ひも理論は最終理論になる希望をになって発明された。その潜在的ユニークさのために研究に値するものになった。もし一つのユニークな理論があるという仮説を受け入れるならば、理論に数学的な矛盾がないことの検証に専念する方が、実験的検証を発展させるよりも大事なのだ。

数学的に矛盾のない理論が自然に一つしかないことを保証する数学的あるいは哲学的な原理はない。事実、いまでは、そのような理論がありえないことが知られている。たとえば、世界が三ではなく、一か二の空間次元をもっているとしよう。この場合、われわれは矛盾のない多数の量子論を構成する。そのなかには重力をもつものもいくつかあるだろう。これらはさまざまな研究プログラムのための腕慣らしの練習としてなされた。われわれはそれらを実験室用にとっておき、好きなことは何でも計算できることがわかっている状況で、新しいアイデアの検証に用いる。二つ以上の空間次元をもつ世界を記述するのに、た

った一つの可能な矛盾のない理論があることはつねに可能だ。しかし、なぜこれが真でなければならないか、どんな理由も知られていない。反証を欠いたままでは、一次元あるいは二次元宇宙を記述する多数の矛盾のない理論は、数学的に矛盾がないというだけでは、自然に理論がたった一つしか許されないという仮定を疑わせるはずだ。

もちろん、抜け出す道はある。それはひも理論が最終理論でないという可能性である。それが多数のバージョンとして現れるという事実以外に、これを信じるに足る理由がある。ひも理論は背景依存で、ある近似的な図式だけを用いて理解されていた点だ。基本理論は背景独立であることを要し、正確に定式化できなければならない。そこでひも理論の研究をしている大部分の人たちはいまでは、第11章で述べたM理論仮説を信じている。つまり、単一の理論があり、それは任意のどの時空とも独立な方法で正確に書き下すことができ、すべての異なるひも理論を統一するものだというのである。

このM理論仮説を支持するいくつかの証拠がある。私も含めて多くの物理学者が、いま、理論をつくりだそうとしているが、それには三つの可能性があるように見える。

1　正しい自然の理論はひも理論でない。

2　M理論仮説は間違いである。統一ひも理論などなく、ひも理論の一つが実験と合致する予測をおこなう。

3　M理論仮説は真である。単一の統一理論があるが、これは世界は多数の異なる物理的相（側面）で現れうると予測する。これらの相では、自然法則は異なって見える。われわれの宇宙はその一つである。

もし可能性1が真であれば、私にできることはひも理論の物語を警告として受け取るだけだ。そこでこれは脇にどけて、他のものを見てみよう。もし可能性2が真であれば、われわれには謎が残る。われわれの世界に適用される矛盾のない理論を何が、あるいはだれが選ぶのか？　異なる可能な矛盾のない理論のリストのなかから、どのようにわれわれの宇宙に適用する理論は選ばれたのか？

この質問には一つしか可能な答えはないように見える。この宇宙の外にいる何かが選択をおこなうのである。もしそれがものごとの判明する方法であれば、これはまさに科学が宗教になる地点だ。神学サークルでは、また何人かの科学者からも同様に、これについてすでに「人間主義観察」と呼ぶものにもとづいた議論の形でたっぷり聞かされているだろ

う。われわれの住む宇宙は非常に特殊らしい。宇宙が何十億年も存続し、生命の構成要素を含めるようになるためには、ある特殊な条件を満たさなければならない。素粒子の質量と基本的な力の強さは、われわれが現に観測している値に非常に近く調整されていなければならない。自然法則のパラメーターはなぜ生命に必要な狭い範囲に落ち着くのか？　これは「人間主義問題」と呼んでいいだろう。

もし異なる可能な矛盾のない自然法則があるが、それらを統一する枠組みがなければ、人間主義問題に対して二つだけ答えが可能である。一つは、われわれはきわめて幸運だということである。もう一つは、法則が何を指定しようとも、法則がそれをするのは生命を存在させるためだ、というものだ。この場合には、宗教論争になる。これはもちろん神学者にはよく知られた議論のバージョンである――間隙を埋める神の議論だ。科学が人間主義問題のような、自然法則にしたがう過程では答えられない問題を提起するとき、神のような外部の作用因を引き合いに出すことは合理的である。この議論の科学的バージョンを「強い人間原理」と呼ぶ。

だが、もう一つの可能性、可能性3がある。これは可能性2に似ているが、重要な違いがある。もし異なるひも理論が単一の理論の異なる相を記述しているのならば、正しい状況のもとではある相から別の相へ転移することも可能である。氷が溶けて水になるように、

宇宙も、あるひも理論が記述しているある相が「溶けて」、もう一つの理論が記述している別の相になることができる。それでも、なぜある相ではなく別の相がわれわれの宇宙を記述しているか、という疑問が残るが、これを解くのはむずかしくない。なぜなら、この描像では宇宙は時間とともに相を変えることができるからである。これもまた宇宙の異なる領域が異なる相で存在している可能性なのだ。

これらの可能性があるとすれば、間隙を埋める神の議論には少なくとも二つの選択肢がある。第一は、多数の宇宙をつくりだす何らかの過程があるというものだ。だとすれば、ビッグバンは存在するものすべての起源ではなく、一種の相転移にすぎないだろう。この過程で、生まれてきたのとは違う異なる相で空間と時間が創造され、ついで冷えて膨張する。このシナリオでは、多数のビッグバンがあり、多数の宇宙を導き出す。天体物理学者マーティン・リースはうまい名称をつけている——彼はこの集まり全体を「多宇宙（マルチバース）」と呼んだ。この過程はランダムな相で宇宙を創造することも可能である。各々は異なるひも理論に支配されているだろう。これらの宇宙は異なる次元数と幾何学をもち、また異なる素粒子の集合をもっていて、異なる法則の集まりにしたがって相互作用するだろう。調整可能なパラメーターがあれば、新しい宇宙が創造されるたびに、ランダムに設定することが可能だろう。

こんな訳で、人間主義問題には簡単な答えがある。あらゆる可能な宇宙のなかで、少数のものだけが生命の住みやすい法則をもつという性質を備えている。宇宙はたいへん多いので、生命の住みやすいチャンスがいかに小さいかを心配する必要はない。マーティン・リースはこれをつぎのように述べている。もし、道端にバッグが見つかり、そのなかに体にぴったり合うスーツが入っていたとすれば、それは不思議なことだ。しかし、衣類店に入り、体にぴったり合うスーツを見つけたとしても謎はない。なぜなら、店には多くの異なるサイズのスーツがあるからだ。これは前に間隙を埋める神と呼んだが、ときには「弱い人間的原理」と呼ばれることもある。

この種類の説明をもつ唯一の問題は、どうすれば論駁できるかを見るのがむずかしいことである。理論がたくさんの宇宙を生み出すかぎり、少なくともわれわれの宇宙に似たものが一つあればいい。理論はわれわれの宇宙に似たものが少なくとも一つ存在する以外には、何も予測をしない。しかし、すでにこの宇宙があるのだから、この理論を論駁する術はない。これはいいことに見えるが、実はそうではない。なぜなら、反駁できない理論は真に科学の一部ではありえないからだ。

人間主義問題に科学的解答を与える理論は可能だろうか？　こうした理論は、宇宙がある相から別の相への物理的転移ができる可能性をめぐってつくることができる。もし宇宙

の歴史をビッグバン以前にまでさかのぼって見ることができれば、異なる次元をもち、異なる法則を満たすように見える、異なる相の宇宙の一つあるいは系列全体が見られるかもしれない。そうすれば、ビッグバンはただたんに、宇宙が経過した転移の系列のもっとも最近のものにすぎなくなるだろう。各々の相は異なるひも理論に支配されているかもしれないが、宇宙の歴史全体は単一の法則に支配されているだろう――M理論だ。つぎに、なぜ宇宙がわれわれのいるような相を「選んだ」かについて、物理の言葉で説明する必要がある。なぜこの相は何十億年も存在し、生命にとって住みやすいものなのか。

アイデアの一つは、新しい宇宙はブラックホールの内部でつくられるというものである。この場合、われわれの宇宙は多数の子供をもっている。少なくとも10^{18}個のブラックホールがあるからである。古い宇宙から新しい宇宙へ移っても法則の変化は小さいので、われわれの宇宙を生み出した宇宙の法則は、われわれ自身の法則とはそんなに違っていないことを意味する。この二つの仮定に立てば、形の上では自然選択と似たメカニズムが働く。なぜなら、多数の世代を経ると、多くのブラックホールを生じた宇宙が、宇宙の集団を支配するからである。ついで理論は、ランダムに選ばれた宇宙は、わずかに異なる値のパラメーターをもつ宇宙よりも、多くのブラックホールをつくるという性質をもつ、と予測する。ここで、われわれの宇宙はこの予測を満たしているか、と問うことができる。長い話を短

く端折れば、現在までのところ、そうであるらしいのだ。その理由は、炭素化学は生命にいいばかりではなく、ブラックホールで終わる重い星をつくる過程でも重要な役割を果たしていることにある。

この理論で重要なことは、強いおよび弱い人間的原理の両方に対し代案があることを示している点だ。そして、もしそうなら、人間原理は論理的力をもたないだろう。これ以外にも、「宇宙論的自然選択」（ときにはこう呼ばれている）は、科学的説明の可能な様式についてて物理学が生物学から重要な教訓を学べることを示している。もし、宇宙の外部には何もないという原理に固執したければ、外部の作用因から宇宙に命令が下るような説明様式は一切退けねばならない。

生物学者は一世紀半以上にわたってこの問題に直面してきたが、彼らが理解したのは異なる種類のメカニズムがもつ、システムが自分自身を組織する力であった。メカニズムのなかには自然選択が含まれるが、唯一の可能性というわけではない。他の自己組織化のメカニズムがもっと最近、発見されている。これには自己組織化された臨界現象が含まれる。他パー・バクと協力者が創始し、それ以来多くの人たちによって研究されているものだ。他の自己組織化のメカニズムもスチュアート・カウフマンとハロルド・モロヴィッツのような理論生物学者によって研究されている。これと同じ情況で考察できる自己組織化のメカ

ニズムに関してはこのように不足はない。宇宙論が真の科学として登場するには、外部の作用因を用いてものごとを説明するという本能を抑えなければならない、というのが教訓だ。ちょうど地球の生物圏が化学反応のスープからはじまって何十億年もかけて自分を形づくったように、宇宙も、時間をかけて自分を形成したシステムとして、それ自身の言葉で理解しようとしなければならない。

宇宙を生物学的あるいは生態学的システムになぞらえて考えるのは空想的に見えるかもしれないが、これらはすばらしい美しさと複雑さをそなえた世界を形成する、自己組織化プロセスの力のもっともいい例なのである。もしこの見解を真剣に受け止めるならば、その証拠があるかと問わねばならない。宇宙とそれを支配する法則には、自己組織化のメカニズムを用いた説明を必要とする側面があるのだろうか？　すでにこれに対する証拠については論じたが、それは人間主義的な観察である。見るからにありそうにもない素粒子の質量と基本的な力の値だ。素粒子物理学と宇宙論の標準理論における定数が、ランダムに選ばれたとして、炭素化学の世界を導く確率を推定することができる。その確率は10^{220}分の1以下である。しかし炭素化学なしでは、宇宙がブラックホールになるのに十分な質量をもつ重い星を多数つくることはとてもありえず、生命の存在は非常にむずかしい。これは何らかの自己組織化メカニズムがあるという証拠である。

しかし、同じ結論に対してはもっとよい証拠がある。それはわれわれの真ん前に置かれ、あまりになじみ深いために、最初はそれもまた極度にありそうにない構造だということを理解するのがむずかしい。それは空間そのものだ。ニュートンの理論では、世界が無限の三次元空間に存在していると仮定する。この仮定に立てば、あらゆる方向に無限に延びている、われわれを取り巻く三次元空間を知覚する確率は1である。だがもちろん、空間は正確にユークリッド的ではなく、近似的にそうであるにすぎないことをわれわれは知っている。大きな尺度では、重力が光線を曲げるために、空間は湾曲している。これはニュートン理論の予測と真っ向からぶつかるので、われわれは確率1でニュートン理論は誤っていると結論する。

アインシュタインの時空の理論でこの問題を考えるのは少しむずかしい。というのは、その理論では無限個の解があるからである。解の多くは、空間を近似的に平坦にするが、そうならない解も多い。各々の例が無限にあるとすれば、解がランダムに選ばれるとして、結果として可能な宇宙がほとんど三次元ユークリッド空間に見える確率はどのくらいか、と問うのは容易ではない。

この問いは量子重力論で考える方がずっとやさしい。第9章および第10章で説明したように、空間には原子構造があり、ロジャー・ペンローズが創始したスピンネットワークを

用いて記述され、図10－2から図10－5に示されたようなグラフとして描くことができる。プランク尺度よりもはるかに大きな尺度で生存しているわれわれのような観測者にとって、ほとんどユークリッド的三次元空間として知覚されるであろう空間に対してこのようなグラフが幾何学を表すのは、どのくらいの確率か？　そう、スピンネットワーク・グラフの各々のノードは、大雑把に各辺がプランク長さの立方体の体積に対応する。だとすれば、一立方センチメートルごとに内部に10^{99}個のノードがあることになる。宇宙の大きさは少なくとも10^{27}センチメートルなので、少なくとも10^{180}個のノードを含む。空間が宇宙尺度までほとんど平坦なユークリッド三次元空間であるのは、どのくらいの確率かという問題はつぎのように問うことができる。10^{180}個のノードをもつスピンネットワークが、このような平坦なユークリッド幾何学を表現するのは、どのくらいの確率か？

答えは「途方もなくありそうもない」！　見たところ滑らかな、目立つところのない三次元空間を表現するには、スピンネットワークはある種の規則的な配列、結晶に似たものをもたねばならない。このようなスピンネットワークは金属に似ている。金属が滑らかに見えるのは、膨大な数の原子を含むほとんど完全な結晶からなる、規則正しい配列をもつからである。そこでわれわれが尋ねようとしている問題は、つぎのように問うのに似ている。宇宙のすべての原子が金属内の原子のように結晶構造に並び、宇宙の端から端まで延

びるのは、どのくらいの確率か？　これはもちろん非常にありそうもない。だが、どの原子の内部にも10^{75}個のスピンネットワーク・ノードがあるので、その全体が規則正しく配列される確率は10^{75}分の1よりも小さい――さらに小さい可能性もある。

これが過小評価であり、確率はそんなに小さくないこともありうる。宇宙のすべての原子が完全な結晶をつくるように並ぶのを保証する方法が一つある。宇宙を絶対零度まで冷やし、水素ガスが固体になるほど高い密度に凝縮する。おそらく世界の幾何学を表現するスピンネットワークは、凍っているために規則的に配列されるだろう。

可能な最大の温度というのは、各々の原子がプランク質量ほどの重さで、光速にかなり近いスピードで運動している気体がもつ温度である。その理由は、もし温度がこの点、つまりプランク温度を越えて上がれば、分子はすべて崩壊してブラックホールになることにある。さて、空間の原子が規則的配列をすれば、温度はこの可能な最大の温度よりもずっとずっと小さいはずだ。事実、宇宙の温度はプランク温度の10^{-32}倍も小さい。したがって、ランダムに選ばれた宇宙がこの温度をもつ確率は、10^{32}分の1よりも小さい。そこでわれわれは、宇宙がこれほど冷たいのは、少なくともこの程度にありそうにないことだ、と結論する。

いずれの推定をしようとも、もし空間がほんとうに離散的な原子構造をもつのなら、わ

れわれが観測しているような完全に滑らかで規則正しい配列をもつことは、とてもありそうもない、との結論にいたる。だからこれは実際、説明を要することである。もし、外部の作用因が宇宙の状態を選んだという説明を認めないならば、われわれの過去において何らかの自己組織化のメカニズムが働き、世界を信じられないほどありそうもない状態に駆り立てたに相違ない。宇宙研究者はしばらくのあいだこの問題に頭を悩ませた。提案された一つの解決策は「インフレーション」と呼ばれる。これは宇宙が平坦になるまで、つまりほとんど今日見えるユークリッド的宇宙になるまで、自分自身を指数関数的に速く膨張させるメカニズムを言う。インフレーションは問題の一部を解いたが、それにはありそうにないある条件が必要だった。インフレーションが作用をはじめるとき、宇宙はすでに少なくともプランク尺度の10^5倍の尺度で滑らかでなければならないのだ。そして、われわれの知るかぎりインフレーションは二つのパラメーターの微調整を必要としていた。その一つは宇宙定数である。これは量子重力論における自然な値に比べて少なくとも因子10^{60}だけ小さくならねばならなかった。もう一つは、ある力の強さである。これはインフレーションの多くのバージョンではたかだか10^{-6}の大きさである。差し引きすると、インフレーションが働くには確率がせいぜい10^{-81}であるような状況が必要だ、ということになる。たとえ宇宙定数を除いても、確率がせいぜい10^{-21}である状況が必要である。したがって、インフレー

ションは答えの一部であるが、答えを完成することはできない。

いずれにしても量子重力論が世界に贈るもっともすばらしい贈り物は、世界がとにかく存在しているという奇跡を再評価するとともに、このミステリーの少なくともある小さな側面が理解できるかもしれないという信念を新たにしてくれることだ。

エピローグ　ありうべき未来

もし本書の私の説明がうまくいっていれば、二十世紀物理学革命を完成させたいと提起した問題について、読者の方々にいくらかは理解していただけたはずだ。最終的に量子重力論を見いだしたときに、何が問題になっているか、それが何を意味するかを少なくとも理解していただけたら、と希望する。願わくば私の説明が十分明確で、それを量子論や相対性理論のような確立された科学の一部と区別するのに問題が生じないことを。

なかんずく私は、基本法則と原理の探究が支持するに足るものであることを納得してい

ただきたいと願う。研究者社会は努力に対する支持を社会全体に仰いでいる。この依存関係は二重である。第一に、空間と時間は何か、あるいは宇宙はどこから来たか、に関心をもっているのがわれわれ研究者だけでないことは、われわれにとってとても重要なことだ。科学の最先端を一般の人々に伝えるという立場にいて、もっとも興奮させられるのは、いかに多くの人たちがわれわれの成功あるいは失敗を気にかけてくれるかに気づいたことだった。多数の若い科学者はこの感覚をもっているが、競争の激しい今日の学界の環境では、生涯にわたる研究生活を通じてそれを維持するのは容易ではない。この感覚に灯をともしつづけるには、学習の強い欲求以外に何も言わない人びととの交流がなによりだ。

われわれが一般の人びとの支持に頼る二番目の理由は、われわれの大部分はこの仕事以外に何もつくりださないからである。われわれは他に売るものがないので、社会の寛大さに研究への支持を仰ぐ。今日、科学が置かれている政治的および官僚主義的環境は、大きくて高価な科学に有利である――そういうプロジェクトに資金を与えれば、どの分野の科学を支持するかを決定する者たちのキャリアを高めてくれる。最後に、学界内政治は問題に対するアプローチの種類を増やすよりも減らすように働く。残念なことに、これが量子重力論における最近の傾向である。これは意図的なものではないが、助成担当者と学部長の成功を測る決定的な効果である。もし少数の助成担当者と少数の学部長、そして、最小

ではないが少数の私立財団の原理原則にもとづいた公約がなければ、この種の基本的な、ハイリスク／ハイペイオフ研究が消えてしまう危険に曝されたであろう。

量子重力論は何と言ってもハイリスクである。不幸にして実験検証がないことは、つぎのことを意味する。比較的大きなグループの人たちが何十年も研究した挙げ句、完全に時間を浪費した、あるいは少なくとも得るところが少なかった、あるいは、最初は魅力的な理論上の可能性に見えたものを除去する以外にすることがないことに気づくのである。社会学的に測定すれば、ひも理論はいまのところ非常に健全であり、おそらく一〇〇〇人の実務家を擁している。ループ理論はもっとがっしりしており、それほどの人手はなく、一〇〇人かそこらの研究者である。他の方角、たとえばペンローズのツイスター理論のような方向を、一握りの人たちが依然追いかけている。しかし、いまから三〇年たって問題になるのは、理論のどの部分が正しかったかである。一人のいいアイデアの持ち主は、基本的な問題を解かずに、漸進的に理論を押し進めようとする一〇〇人の仕事に勝る。だから、われわれは学界内政治がここであまり影響を振るうのを許すわけにいかないし、さもないとわれわれはみんなで一つのことしかできないで終わることになる。さらにもっと重要なのは、最初はどんなにありそうもなく、あるいは主流から離れたように見えても、若い人たちがそこには自分たちのアイデアをもちこむ余地がある、と感じられるような空気を維

持することである。

私は本書を締めくくるに当たって、量子重力論の問題が最後にどのように解かれるかについていくつか予測をおこないたい。いま、われわれは十分正しい、十分頑丈ないくつかの提案を検討することができ、それが完全に間違っているとは想像できない。私が本書で提示する描像は、すべてのアイデアを真剣に取り上げて集めたものだ。同じ精神で、私は現在の物理学革命がどう終わるかについて、以下のシナリオを提示したい。

- ひも理論のあるバージョンは、量子対象が古典時空の背景に対して運動するレベルで、正しい記述でありつづけるだろう。しかし、基本理論は既存のひも理論のどれとも似ていないだろう。
- ホログラフィック原理のあるバージョンが正しいと判明するが、それは新しい理論の基本原理の一つであろう。だが、それは第12章で論じた原理の強いバージョンではない。
- ループ量子重力論の基礎構造は基本理論のいい鋳型になるだろう。量子状態と量子過程はスピンネットワークに似たダイヤグラム形式で表現されるだろう。近似として以外には、空間あるいは時空の連続的幾何学の概念はない。幾何学的量が面積と体積を含めて、量子化しており、最小限の値をもつことが判明する。

●量子重力論への他のいくつかのアプローチは、最終的な統合において重要な役割を果たすと判明する。そのなかにはロジャー・ペンローズのツイスター理論とアラン・コンヌの非可換幾何学がある。これらは時空の量子幾何学の本性に本質的な洞察を与えると判明する。

●量子論の現在の定式化は基本的でないと判明する。現在の量子論は最初に第3章で述べた類の関係的量子論に取って代わられるが、これはトポス理論の言葉で定式化されるだろう。だが、しばらくすると、これは事象のあいだの情報の流れについての理論として再定式化される。最終的な理論は非局所、あるいはもっといい言い方では、局所外である。熱や温度などの熱力学的量が多数の原子を含むシステムの平均された記述としてだけ意味をもつのと同じように、空間それ自体は、ある一定の種類の宇宙の適切な記述としてのみ見られるようになる。「状態」という考え方は最終理論にはない。「最終理論」は過程というアイデアとそれらのあいだを伝わり、それらのうちで修飾される情報をめぐって形づくられるだろう。

●因果律は基本理論の必然的な構成要素である。その理論は離散的できごととそれらのあいだの因果関係を用いて量子宇宙を記述する。因果律の概念は、空間がもはや意味のある概念として成り立たないレベルでも生き残るだろう。

●最終理論は素粒子の質量としてただ一つの値を予測できないだろう。この理論は基本物理学におけるこれらおよび他の量の値として、一組の可能な値を許す。しかし、われわれが観測するパラメーターの値に対する合理的な、人間主義でない、反証可能な説明があるだろう。

●二〇一〇年までに、遅く見積もっても二〇一五年までに、量子重力論の基礎的な枠組みができるだろう。最後のステップはいかにニュートンの慣性の原理を量子時空の言語で再定式化するかを発見することである。導かれる結論をすべて考え出すには、さらに多くの歳月がかかるだろうが、基礎的枠組みはたいへん説得力があり自然なので、いったん発見されればそのまま不変に保たれるだろう。

●理論を手に入れてから一〇年以内に、新しい実験が工夫され、検証することが可能になるだろう。量子重力論は初期の宇宙について予測をおこない、マイクロ波背景放射と重力放射を含めビッグバンから来た放射を観測することで検証されるだろう。

●二十一世紀の終わりまでに、量子重力論は世界中いたるところで高校生に教えられるだろう。

訳者あとがき

本書はリー・スモーリンの"Three Roads to Quantum Gravity" (Weidenfeld & Nicolson, 2000) の翻訳である。なお、本書はサイエンス・マスターズ・シリーズに入れる都合もあって、大意を損なわない範囲で多少の省略を行った。

著者スモーリンはハンプシャー・カレッジ、ハーバード大学で教育を受けた。一九七九年、ハーバード大学で学位をとり、プリンストン高等研究所でポストドクをおこなったが、大学院およびそれ以後の教育については本書のなかでも触れられていて興味深い。イェール大学、シラキュース大学をへて、現在はペンシルヴァニア州立大学の重力物理学・幾何学センターの教授であり、オクスフォード、ケンブリッジをはじめ世界各地の大学で講義するほか、量子論、宇宙論、相対性理論の統合に向けて多数の寄与があり、その分野では世界的なリーダーである。雑誌『エンデヴァー』はかつて「新しいアインシュタイン」と呼んだほどであった。

ニューヨーク市の生まれだが、精神的にもニューヨークっ子で、ジャズギターやヨットを趣味とし、哲学や芸術にも造詣が深く、芸術、演劇、映画などの活動にも数多く参加しているが、NASAの天体生物学研究所などのメンバーであることが、もう一つの顔である。

そして実はスモーリンの最初の著書は『The Life of the Cosmos（宇宙の生命）』（一九九七年）である。それは量子宇宙論は複雑な、自己組織する宇宙を論じないかぎり整合的ではありえないという、従来のとは根本的に異なる新しい宇宙論を唱えた。それによれば、生物の進化に似た自己組織化の過程で、宇宙はブラックホールを通して発展し、新しいビッグバンと新しい宇宙が生じる。物理定数の値がブラックホールの成長を最大にするような時空の領域が支配的になるという、ダーウィン的な選択が起こる。その結果が生命が宇宙の根本原理の当然の帰結であるような宇宙であるという。

さて本書は、著者の本業である物理学が中心である。主要なテーマは重力の量子論、あるいは量子重力論である。これはまだ完成していないが、名前だけはもう出来上がっているという代物だ。量子重力論はその名の通り、重力を扱うのだが、必然的に空間と時間とは何か、という問いに答えるざるをえないのである。

統一理論はアインシュタインが後半生をかけて追い求めたのものだった。これも重力を

扱うのだが、重力の特殊性のために時空を扱う羽目に陥った。統一場の理論は重力を含むためにはじめから空間、時間とは何かを含んでいたのだった。考えてみれば、二十世紀のはじめから物理学者はこの希望に突き動かされてきていたのである。そして希望と絶望とが交互に現れるのだが、今回は、あちらこちらにちらほら見える新しい萌芽がそのまま育っていくのだろうか。現代物理学の聖杯というべき量子重力論を求めて物理学者は色めいている。

二十世紀は二つの画期的な理論ではじまった。この二つの理論を統合することは、とんでもない難問だった。

スモーリンが大学院で量子重力論を専攻しようとしたとき、指導教授が思い止まらせようとしたのも無理はなかった。だが、時代は変わった。当時の小さなパイオニア集団は今では大きなコミュニティに育っている。何回かチャレンジした末、物理学者は解決の道を見つけ、やっと踏み出すことができた。一九八〇年代半ばから状況は大きく変わったのである。

二つの理論の一つは相対性理論であった。これは大きなものの世界を取り扱う。惑星、太陽系を越えて銀河の世界におよび、はては全体としての宇宙そのものを論じる。もう一つは量子論である。微小なものの世界だ。あらゆる素粒子の理論であることを目指す。そ

れはまた宇宙のはじまりは何かという問いに答えなくてはならない。

量子論は観測されるものと観測者の関係を根底的に変えたが、ニュートンの時間と空間のアイデアの大部分を残した。一方、一般相対性理論は観測者と観測されるものの関係を受け入れたが時空のアイデアを取り入れたのである。関係的に見ることがいかに大事かとスモーリンは述べ、すべて時間と空間は関係のネットワーク以外のなにものでもないと述べている。十八世紀の初頭、哲学者ライプニッツが空間を関係的に見ることを唱えたが、これはその直系だ。

つづけて、「宇宙の外部にはなにもない」から「未来にはもっと多くのことが見ることができる」し、「多数の観測者、多数でない世界」で、若い研究者なかまの議論のうちに、いつの間にか読者は新しい世界の引きずり込まれる。その後は新しい世界像に立ち入って眺める。

新旧の対立が激しくなり、そして新しい世界像が真理にもっとも近づくのはいわゆるプランク尺度の成り立つところである。そこは原子核よりも二〇桁も小さく、時間も一〇のマイナス四三乗も小さい世界である。そこでは今、三つの試みがある。

その一つはブラックホールの熱力学と情報の理論である。もう一つはひも理論である。ひも理論では、究極的な実在は振動する直線状の数学的な対象であって、九つの空間次元

に存在しており、そのさまざまな振動様式が素粒子を表しているといわれる。これはブライアン・グリーンの『エレガントな宇宙』（草思社）に詳しく述べられているが、スモーリンはこれも最終的なものではないという。

第三の道は、ループ量子重力論と呼ばれるもので、スモーリンはどうやらこれにもっとも力を入れているらしいが、理解するのがいささかむずかしいだろう。このアプローチによれば、空間は非常に小さな微小な体積が単位になっており、時空が一種の「スピンの泡」を形作っているという。どれもプランク尺度の構造なので、われわれには滑らかだという印象を与えるが、見えない世界の背後にはこの小さな世界があって、そこでは休むことなくダンスが踊られているのだ。

もっとも、スモーリンは三つのアプローチが補完的だと認めている。そこでもループ量子重力論はいい鋳型になれるだろう。この尺度は極度に小さいために、最大の粒子加速器で行った実験でさえ、目下その範囲には遠く及ばないが、楽観主義者の彼は数年後にはけりが着くのではないか、と予測している。遅くとも二〇一五年までには、量子重力論に基礎的な枠組みができるだろうし、それから一〇年以内には実験検証がなされるだろう、という。これも彼の楽観主義の現れかもしれないが、二十一世紀の終わりまでには量子重力論が「世界中いたるところで高校生に教えられる」だろう、という。

本書にはこうした類の予想を含んだ本としては当然だが、反対する者も少なくないだろうが、どの評者も少なくとも著者の議論を楽しんでいるようだ。それはそれとして、本書の魅力の一つは著者とさまざまな人物との交流にあるような気がする。例を上げるまでもなく随所にあるので読者はじかに見ていただきたいが、著者の筆の力のせいだろうか、科学者が自由に触れ合い、刺激を与えつつ、育っていく様子が実によくわかる。そして、最終章でのべられている「基本法則と原理の探究が支持するに足るものである」ことを、実感をもって読むことができる。

もっともそれには「本書の私の説明がうまくいっていれば」という条件がついている。訳者も責任があることだが、訳者としては同じことを願うのみである。それにつけて、草思社編集部の田中尚史氏にはそそっかしい訳者は一方ならぬ世話になった。末筆になったが、記して謝意を表明したい。

二〇〇二年六月

訳者

サイエンス・マスターズ 17
量子宇宙への 3 つの道

❀❀❀❀❀

訳者との申し合わせにより検印廃止

2002 年 7 月 31 日　第 1 刷発行

著　者　リー・スモーリン
訳　者　林　　一
装丁者　平野甲賀、向井裕一
発行者　木谷東男
発行所　株式会社草思社
〒 151-0051　東京都渋谷区千駄ヶ谷 2-33-8
電　話　営業 03(3470)6565 編集 03(3470)6566
振　替　00170-9-23552
印　刷　株式会社精興社
製　本　大口製本印刷株式会社
Printed in Japan
ISBN4-7942-1156-2